e-ISSN: 2149-3367

FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Ahmet Necdet Sezer Kampusü
Fen Bilimleri Enstitüsü
AFYONKARAHİSAR
Tel: 444 03 03 / 1460-1470
Belgegeçer: 0 272 218 14 62
E-posta: fmbd@aku.edu.tr

https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

e-ISSN: 2149-3367 CİLT / VOLUME: XXV SAYI / NUMBER: 4 AĞUSTOS / AUGUST 2025

Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

Cilt / Volume 25
Sayı / Number 4

e – ISSN: 2149-3367

AĞUSTOS 2025

AUGUST 2025

Dergi Hakkında

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKÜ FEMÜBİD), fen ve mühendislik bilimleri alanlarındaki güncel gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda nitelikli bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır.

Eski adıyla "Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi", 1999 yılında yılda 2 sayı olarak Türkçe ve İngilizce makalelerle yayın hayatına başlamıştır. Ocak 2013'ten itibaren isim değiştirerek "Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi" olarak yayın hayatına devam etmiştir. Makale değerlendirme sürecinin şeffaflaştırılması ve optimizasyonu için Şubat 2013 itibarıyla çevrimiçi makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır. Ocak 2015 itibaren yazarların başvuru işlemlerinin kolaylaştırılması, değerlendirme sürecindeki çalışmaların olabildiğince şeffaf takip edebilmesi, yazar ve editoryal ekip arasındaki iletişimin daha etkin kullanılabilmesi, yayınlanma sürecindeki düzenleme işlemlerinin kolaylaştırılması, okuyucuların yayımlanan makalelere daha kolay ulaşma imkânları gibi avantajlar sağlayan elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yayınlanmaktadır. 2015 yılından itibaren yayınlanan sayılarla birlikte TRDizin'de (TÜBİTAK-ULAKBIM) indekslenerek mühendislik ve temel bilimler konularında makaleler yayınlamaya devam etmektedir. Ocak 2020 yılından itibaren AKÜ FEMÜBİD yılda 6 sayı (Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olarak Türkçe ve İngilizce makaleleri Dergi Park aracılığıyla online olarak kabul etmektedir.

Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi internet sayfamızdan (https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid) kayıt yaptırarak, özgün bilimsel araştırma makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Dergimize yayınlanmak üzere başvurusu yapılan makaleler Dergi Park arayüzü ile en az iki hakem (çift taraflı kör hakemlik sistemi) tarafından değerlendirilmektedir. Yazıları değerlendiren hakemlerin adları yazarlara bildirilmez. Hakemler de yazarların adlarını göremez.

Derginin Amacı

Ulusal ve uluslararası temel bilimler ve mühendislik ile ilgili çeşitli disiplinler üzerine çalışan akademisyenler, araştırmacılar ve öğrencilerin Türkçe ve İngilizce yayın yapabilmesini sağlamak, ayrıca bu alanda nitelikli akademik yayınların toplumsal ve bilimsel gelişime katkı sağlaması için bir ortam sunmak amacını gütmektedir.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir. Ayrıca, lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak hazırlanan özgün ve daha önce hiçbir yerde yayımlanmamış olan araştırma makaleleri kabul edilmektedir.

Dergideki Yayın Çeşitliliği

Özellikle araştırma makaleleri, orijinal modelleme ve matematiksel çalışmalar, disiplinlerarası mühendislik uygulamalarını içeren çalışmalar ve son teknoloji araştırmaları dergimize kabul edilmektedir. Teknik notlar, derlemeler, editöre mektuplar ve kısa bildirimler kabul edilmemektedir. Lütfen gönderiminizi yaparken seçenekler listesinden uygun makale türünü seçtiğinizden emin olunuz. Özel sayılara başvuru yapan yazarların, özel sayı makale türünü bu listeden seçtiklerinden emin olmaları gerekmektedir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

İMTİYAZ SAHİBİ/OWNER

Bekir YALÇIN — Mechanical Engineering Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr

EDİTÖRLER / EDITORS-IN-CHIEF

Bekir YALÇIN — Mechanical Engineering Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr

Ziya Özgür YAZICI — Materials Science and Engineering. Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
e-mail: zyazici@aku.edu.tr

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSISTANT EDITORS-IN-CHIEF

Can BAŞARAN — Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
cbasaran@aku.edu.tr

İbrahim YAVUZ — Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
iyavuz@aku.edu.tr

Şükrü TORTOP — Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
stortop@aku.edu.tr

İLETİŞİM VE DESTEK/ CONTACT AND SUPPORT

Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Ahmet Necdet Sezer Kampusu,
03200, Afyonkarahisar/Türkiye

Telefon/Phones: 444 03 03 / 1472-1473
Belgegeçer/Fax: 0 272 218 14 62
e-posta/e-mail: fmbd@aku.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ/ EDITORIAL BOARD

Ayça H. ATLI	Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *aturkan@aku.edu.tr*
Bekir ORUNCAK	Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *boruncak@aku.edu.tr*
Can BAŞARAN	Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *cbasaran@aku.edu.tr*
Emre AKARSLAN	Renewable Energy Systems, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *akarslan@aku.edu.tr*
Fatma KAYNARCA	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *fkaynarca@aku.edu.tr*
Güray SONUGÜR	Mechatronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *gsonugur@aku.edu.tr*
Hakan TERZİ	Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *hterzi@aku.edu.tr*
İbrahim YAVUZ	Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *iyavuz@aku.edu.tr*
İ. Sinan ATLI	Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *sinanatli@aku.edu.tr*
Mehmet KILINÇ	Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *mkilinc@aku.edu.tr*
Mürüvvet KURT	Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *muruvvetduz@aku.edu.tr*
Naim KARASEKRETER	Computer Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *karasekreter@aku.edu.tr*
Nevzat OLGUN	Software Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *nolgun@aku.edu.tr*
Oğuzhan ALAGÖZ	Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *oalagoz@aku.edu.tr*
Ömer F. GÜLER	Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *ofguler@aku.edu.tr*
Ömer G. NARİN	Geomatics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *gokberknarin@aku.edu.tr*
Ömer HAZMAN	Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *ohazman@aku.edu.tr*
Özkan ARSLAN	Computer Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *oaslan@aku.edu.tr*
Ramazan EROL	Mathematics and Science Education, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *rerol@aku.edu.tr*
Recep KURTULUŞ	Materials Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *rkurtulus@aku.edu.tr*
Şükrü A. BAYDIR	Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *abaydir@aku.edu.tr*
Şükrü TORTOP	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *stortop@aku.edu.tr*
Tolga ÖZER	*Electric-Electronic Engineering,* Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *tolgaozer@aku.edu.tr*
Tuğba YALÇIN UZUN	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *tyalcin@aku.edu.tr*
Uçman ERGÜN	Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *uergun@aku.edu.tr*
Veli BAŞARAN	Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *vbasaran@aku.edu.tr*
Z. Ebru SAYIN	Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) *zerkan@aku.edu.tr*

DİL EDİTÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS

İ. Sinan ATLI Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
sinanatli@aku.edu.tr

MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR

İbrahim YAVUZ Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
iyavuz@aku.edu.tr
İsmail YILDIZ İscehisar Vocational School, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
iyildiz@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article
Pyridaben aktif maddesinin Ames Salmonella/Mikrozom Metodu ile Mutajenitesinin Değerlendirilmesi
Assessment of Mutagenicity of Pyridaben by Ames Salmonella/Microsome Method
Dilek Akyıl — **041001(704-711)**

Araştırma Makalesi / Research Article
HUVEC Hücre Hattında CRISPR/CAS9 için Polimerik Nanopartikül Tabanlı Transfeksiyon Ajanının Kullanılabilirliğinin Araştırılması
Investigation of the Usability of Polymeric Nanoparticle-Based Transfection Agent for CRISPR/CAS9 in HUVEC Cell Line
Rizvan İmamoğlu, Özlem Kaplan, Mehmet Koray Gök, İsa Gökçe — **041002(712-719)**

KİMYA / CHEMISTRY (12)

Araştırma Makalesi / Research Article
Yeni Bisiklik Pirol Türevlerinin Sentezi için Etkili Sentetik Yöntem
Efficient Synthetic Methodology for the Synthesis of New Bicyclic Pyrrole Derivatives
Nuriye Tuna Subaşı — **041201(720-728)**

Araştırma Makalesi / Research Article
Poli Fonksiyonel Tetra-aril-1,4-dihidropirolo[3,2-b]piroller: Sentezi, Karakterizasyonu ve Fotofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi
Polyfunctional Tetra-aryl-1,4-dihydropyrrolo[3,2-b]pyrroles: Synthesis, Characterization and Determination of Photophysical Properties
Güler Yağız Erdemir — **041202(729-737)**

Araştırma Makalesi / Research Article
The Composite Microbeads of Alginate, Carrageenan, Gelatin, and Poly-(Lactic-co-Glycolic Acid): Swelling, Cefaclor Loading and Release
Aljinat, Karragenan, Jelatin ve Poli-(Laktik-ko-Glikolik Asit) Kompozit Mikroboncukları: Şişme, Sefaklor Yükleme ve Salınımı
Buse Semerci Arıkan, Demet Baybaş — **041203(738-756)**

MATEMATİK & İSTATİSTİK / MATHEMATICS & STATISTICS (13)

Araştırma Makalesi / Research Article
Sonlu Kanonik Hipergrupların SS-Tümlenmiş Althipergrupları Üzerine
On SS-Supplemented Subhypergroups of Finite Canonical Hypergroups
Sena Cam, Burcu Nişancı Türkmen, Yıldız Aydın — **041301(757-766)**

Araştırma Makalesi / Research Article
On The Robust D-Stability of The Polytope of Matrices
Matrisler Politopunun Gürbüz D-Kararlılığı Üzerine
Şerife Yılmaz — **041302(767-773)**

Araştırma Makalesi / Research Article
Theory and Applications of the Double Laplace Transform for Local Derivatives with the Mittag Leffler Kernel **041303(774-784)**
Mittag Leffler Çekirdeği ile Lokal Türevler için Çift Katlı Laplace Dönüşümü Teorisi ve Uygulamaları
Burak Özküçük, Erdal Baş

Araştırma Makalesi / Research Article
Failure Prediction Using Ensemble Learning: A Comparative Study with Synthetic and Real-World Datasets **041304(785-797)**
Topluluk Öğrenmesi Kullanılarak Arıza Tahmini: Sentetik ve Gerçek Dünya Veri Setleriyle Karşılaştırmalı Bir Çalışma
Aslı Beyza Çiftpınar, Pelin Kanar, Zeynep Idil Erzurum Cicek

Araştırma Makalesi / Research Article
A Novel Perspective on Resolving the Discounted Transportation Problem **041305(798-803)**
İndirimli Taşıma Problemine Yeni Bir Bakış
Nurdan Kara

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ / YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ (52)

Araştırma Makalesi / Research Article
Konvolüsyon İşlemi Üzerinde GPU Eniyileme Yöntemlerinin Etkisi **045201(804-815)**
Impact of GPU Optimization Methods on Convolution Operation
Kadir Emre Özer, Sercan Demirci

Araştırma Makalesi / Research Article
PCB Üretiminde Çok Sınıflı Kusur Tespiti için YOLO Tabanlı Derin Öğrenme Modeli **045202(816-826)**
YOLO-Based Deep Learning Model for Multi-Class Defect Detection in the PCB Manufacturing
İzemnur Budak, Sezen Bal, Hayriye Korkmaz

Araştırma Makalesi / Research Article
Decision Support Systems Based on Machine Learning for Detection of Liver Diseases **045203(827-837)**
Karaciğer Hastalıklarının Tespiti İçin Makine Öğrenmesine Dayalı Karar Destek Sistemleri
Pınar İlter, Yasin Kırelli

GIDA, ÇEVRE &ORMAN / FOOD, ENVIRONMENTAL & FOREST (54)

Araştırma Makalesi / Research Article
Nar Suyu ve Nar Ekşisi Örneklerinin HMF İçerikleri, Antioksidan Aktivite ve Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi **045401(838-845)**
Determination Of HMF Content, Antioxidant Activity and Physicochemical Properties of Pomegranate Juice and Molasses
Ülkühan Bağış, Tuğça Bilenler, İhsan Karabulut

Araştırma Makalesi / Research Article
Some Chemical and Microbiological Properties of Homemade Capia Pepper Pastes and Purees **045402(846-853)**
Ev Yapimi Kapya Biber Salça ve Pürelerinin Bazi Kimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikleri
Musa Yalman, Seda Özdikmenli Tepeli

İNŞAAT & ULAŞTIRMA / CIVIL ENGİNEERİNG & TRANSPORTATION (56)

Araştırma Makalesi / Research Article
CTP Boyuna ve Enine Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışları **045601(854-864)**
Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams With GFRP Longitudinally Bars And Gfrp Transverse Reinforcement
Saruhan Kartal, Uğur Gündoğan, Ilker Kalkan

Araştırma Makalesi / Research Article
BIM'in Benimsenmesinin Önündeki Engelleri Aşmak için Stratejik Yol Haritası **045602(865-877)**
Roadmap for the Solution of Obstacles in the Transition to BIM
Merve Kılınç Yiğit, Merve Anaç

Araştırma Makalesi / Research Article
İnşaat Projelerinde Süre Uzatımının Hukuki ve Mühendislik Açılardan İncelenmesi **045603(878-902)**
Examination of Time Extension in Construction Projects from Legal and Engineering Perspectives
Ahmet Merter, Gülçağ Albayrak

Araştırma Makalesi / Research Article
Boyalı Yüzeyler Odağında Restorasyon Projelerinde Kurşun Maruziyet Riskinin Değerlendirilmesi **045604(903-915)**
Assessment of Lead Exposure Risk in Restoration and Renovation Projects
İ. Mert Uzun, Özge Akboğa Kale, Damla Sezer

KİMYA & METALURJİ VE MALZEME / CHEMISTRY & METALLURGY AND MATERIALS (57)

Araştırma Makalesi / Research Article
Bağlantı Elemanı Üretim Verimliliğini Artırmak İçin Soğuk Dövme Prosesinde Tasarım İyileştirme ve Simülasyon Çalışmaları **045701(916-927)**
Design Enhancement and Simulation Studies in Cold Forging Process to Increase Efficiency in Fastener Production
Tuğçe Yağcı, Alper Baygut, Osman Çulha

Araştırma Makalesi / Research Article
Determination of Operating Parameters of The Reactive Distillation Column for Methyl Acetate Production and Dynamic Simulation of Process **045702(928-934)**
Metil Asetat Üretiminin Yapıldığı Tepkimeli Damıtma Kolonunun İşletim Parametrelerinin Belirlenmesi ve Prosesin Dinamik Simülasyonu
İsmail Bayram, Alper Günay

Araştırma Makalesi / Research Article
Al-Mg-Si Alaşımlarında Farklı MnCr Miktarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklere Etkisinin İncelenmesi **045703(935-945)**
Investigation of the Effect of Different MnCr Amount on Mechanical and Microstructural Properties of Al-Mg-Si Alloys
Halil Ulupınar, Yiğit Güller, Eren Boyacı, Yahya Bozkurt

MADEN & JEOLOJİ / MINES, & GEOLOGICAL (58)

Araştırma Makalesi / Research Article
Assessing Boundary Shifts at Gölcük Lake (Kütahya) with Google Earth Images
Google Earth Görüntüleri ile Gölcük Gölü (Kütahya) Sınır Değişimlerinin Değerlendirilmesi
Enes Zengin, Recep Uğur Acar, Ali Samet Öngen
045801(946-955)

MÜHENDİSLİK DİĞER / OTHER ENGİNEERİNG (72)

Araştırma Makalesi / Research Article
Epileptik Nöbetlerin Tespiti için Öznitelik Çıkartma ve Sınıflandırma Yöntemleri
Feature Extraction and Classification Methods for Epileptic Seizure Detection
Nuri İkizler, Güneş Ekim
047201(956-968)

Araştırma Makalesi / Research Article
Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali Tasarımı, Ekonomik ve Çevresel Analizi: Hatay İli Örneği
Rooftop Solar Power Plant Design, Economic and Environmental Analysis: Hatay Province Example
İsa Kamacı, Ahmet Yönetken
047202(969-983)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1592743
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041001 (704-711)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041001 (704-711)

Pyridaben aktif maddesinin Ames *Salmonella*/Mikrozom Metodu ile Mutajenitesinin Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 28.11.2024
Kabul/Accepted: 27.01.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Assessment of Mutagenicity of Pyridaben by Ames *Salmonella*/Microsome Method

Dilek AKYIL*

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© 2025 The Author | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmanın tarım alanında akarisit ve insektisit olarak kullanılan ve pyridaben (Pyridaben 20%WP) aktif maddesinin Ames/*Salmonella* mikrozom testi ile mutajenitesinin değerlendirilmesi olup çalışma S9 fraksiyon varlığı ve yokluğunda olmak üzere iki aşamalı olarak planlanmıştır. Deneyde *Salmonella typhimurium*'a ait en yaygın çalışılan iki suş olan TA100 ve TA98 mutant suşları kullanılmış olup uygulama öncesinde test maddelerinin sitotoksik dozları belirlenmiş ve deney için sitotoksik olmayan 5 farklı doz uygulaması yapılmıştır. Mutajenik aktiviteyi belirlemek amacıyla pyridaben'in 800, 400, 200, 100, 50 ve 25 µg/plak dozları çalışılmış olup bulgular Dunnett-t testi kullanılarak istatistiksel açıdan değerlendirilmiş ve veriler negatif kontrol değerleri ile kıyaslanarak değerlendirme yapılmıştır. Test bulgularına göre; pyridaben'in yalnızca 800 µg/plak dozunun hem S9 fraksiyonu varlığında hem de aynı dozun S9 fraksiyonu yokluğunda her iki suşta da mutajenik aktivite gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler Ames testi; Akarisit; İnsektisit; Mutajenite, Pestisit

Abstract

This study is to evaluate the mutagenicity of pyridaben (Pyridaben 20%WP), which is used as an insecticide and acaricide in agriculture, by Ames/*Salmonella* microsome test and the study was planned in two stages as in the presence and absence of S9 fraction. In the study, the two most widely studied strains of *Salmonella typhimurium*, TA98 and TA100 mutant strains, were used and the cytotoxic doses of the test substances were determined before the application and 5 different non-cytotoxic doses were applied for the experiment. In order to determine the mutagenic activity, pyridaben doses of 800, 400, 200, 100, 50 and 25 µg/plate were applied and the data were evaluated statistically using Dunnett's-t test and the data were compared with the negative control values. According to the test findings; it was determined that only 800 µg/plate dose of pyridaben showed mutagenic activity in both strains both in the presence of S9 fraction and in the absence of S9 fraction at the same dose.

Keywords Ames test; Acaricide; Insecticide; Mutagenicity, Pesticide

1. Giriş

Pestisitler, hızlı etkileri, kolay kullanımları ve ekonomik olmaları nedeniyle zararlı yönetiminde tarımda yaygın olarak faydalanılan maddelerdendir. Ancak, pestisitlerin yanlış veya bilinçsiz kullanımı bitkilere, çevreye, yaban hayatına ve halk sağlığına oldukça ciddi zararlar verebilir. Çünkü tarımsal üretimde kullanılan pestisitler genellikle tüketilen meyve ve sebzeler üzerinde kalıntılar bırakmaktadır ve mahsullerin kirlenmesi günümüzün önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Pestisitlere maruz kalma, kısa vadede mide bulantısı ve baş ağrısı gibi sağlık sorunlarına neden olabilir. Ayrıca, nörotoksisite, sitogenetik hasar, kısırlık ve endokrin sistem sorunları kronik olarak ortaya çıkabilir (Baldi vd. 2001) ve uzun vadede lösemi, Hodgkin dışı lenfoma, beyin, kemik, meme, yumurtalık, prostat, testis ve karaciğer kanserleri ortaya çıkabilir (Cantor vd. 1992). Bu nedenle, pestisit bakımından ürünlerin sağlık risk değerlendirmesinin yapılması çok önemlidir. Türkiye'de birçok pestisit için kalıntı değerlendirilmeleri yapılmış olup aynı zamanda genotoksik potansiyelleri açısından da yapılan çalışmalar artmasına rağmen, sağlık risk değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmalar halen istenen düzeyde değildir.

Pyridaben aktif maddesi, salatalık, patlıcan, domates, biber gibi sebzeler, elma ve turunçgiller üzerindeki birçok akar ve böceğe karşı tarımda sık kullanılan bir insektisit-akarisittir (Rand ve Clark 2000). Pyridazinone grubu pestisitler içerisinde yer alan pyridaben (Yu 2008) akarlar ve böceklerde mitokondriyal elektron taşıma zincirindeki Kompleks I'i engelleyerek işlev görür (Bose ve Beal 2016) ve Dünya Sağlık Örgütü'nün pestisitlerin tehlikeye göre

*Sorumlu yazar / Corresponding Author: Dilek Akyıl e-posta/e-mail: dilekakyil9@gmail.com

sınıflandırılmasında pyridaben orta derecede tehlikeli (Sınıf II) bir pestisit olarak sınıflandırılmaktadır (Dünya Sağlık Örgütü, 2020). Balkan ve Kara (2022)'nın Tokat ilinde üretilen bazı sebzelerde pestisit kalıntılarını taradıkları çalışmada pyridaben konsantrasyonları Avrupa Birliği Maksimum Kalıntı Limitleri'nin belirlediği doz aralığının üstünde çıkmıştır. Kanbolat vd. (2023) tarafından yine Tokat'ta yapılan diğer bir çalışmada ise bazı meyvelerdeki pestisit kalıntılarının belirlenmesi için gerçekleştirilen çalışmada elmalarda pyridaben seviyesinin doz aralığının üstünde olduğu saptanmıştır. Zhang vd. (2005), turunçgillerdeki pyridaben kalıntılarının dinamik değişimini incelemiş ve farklı deney alanlarında portakaldaki pyridaben'in yarı ömrünün 11,9 ila 24,9 gün arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Ma vd. (2007) elmalardaki pyridaben kalıntı dinamiklerini incelemiş ve elmadaki pyridaben'in yarı ömrünün 7,3 gün olduğunu göstermişlerdir. Chen vd. (2011) muzdaki pyridaben kalıntılarının dağılma dinamiklerini belirlemiş ve yarı ömrün 2,8 ila 2,9 gün arasında değiştiğini saptamışlardır.

Gomez vd. (2007)'nin yaptıkları çalışmada Kompleks I'in pyridaben tarafından seçici olarak engellenmesinin, Parkinson hastalığının patojenik mekanizmasının bir parçası olabileceği rapor edilmiştir. Aynı zamanda pyridaben'in domuzlarda erken gebelikte embriyonik kayba neden olabileceği saptanmıştır (Bae vd. 2021), Pyridaben karides (*Mysidopsis bahia*), mavi güneş balığı (*Lepornis macrochirus*), gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) ve zebra balığı (*Danio rerio*) gibi suda yaşayan organizmalar için oldukça toksiktir (Rand ve Clark 2000; Ma vd. 2021a). Bal arıları ve yırtıcı akarlar gibi hedef olmayan eklembacaklılar için, pyridaben'in tehlike katsayısı değerleri tetikleyici değerlerin önemli ölçüde üzerinde saptanmıştır (Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi 2010). Ayrıca pyridaben uygulaması, *Euseius scutalis*'in yumurtalarında, larvalarında ve yetişkinlerinde yüksek ölüm oranlarına neden olmuş ve sıklıkla kullanılan akarisitler arasında yetişkin dişilerin doğurganlığını olumsuz yönde etkilemiştir (Döker ve Kazak 2020).

Mutasyona neden olan kimyasal maddelerin tespiti son yıllarda o maddenin risk değerlendirmesinde önemli bir parametre haline gelmiş olup, bu tür kimyasallar üreme sorunlarına yol açmakta ve gelecek nesillerde çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Bu maddelerin aynı zamanda kansere neden olma potansiyelleri de olup, bu aşamada mutajenite testleri önem kazanmaktadır (Moulas vd. 2013).

Yaşam standartlarındaki artış, son yıllarda tarım ürünlerindeki pestisit kalıntıları ve bu maddelerin potansiyel genotoksik etkileri konusunda da farkındalığı artırmıştır. Güvenli pestisit kullanımının sağlanması ve risk değerlendirmelerinin yapılması Türkiye'nin tarım ürünü ihracatını teşvik etmede de oldukça önemlidir. Pestisitlerin genotoksik açıdan değerlendirilmesi hem yerel tarımsal kalkınma hem de tüketicilerde farkındalık yaratmak açısından önemlidir. Daha önceki çalışmalar bazı pestisitlerin farklı biyolojik test sistemlerinde klastojenik ve mutajenik olduğunu göstermiştir (Moulas vd. 2013, Özkara 2017, Akyıl 2021, Özkara 2022). Ames testi çeşitli kimyasal maddelerin mutajenik ve antimutajenik etkilerinin belirlenmesinde önemli bir test yöntemi olup, genotoksisitenin tespitinde %90'ın üzerinde etkiye sahiptir (Kauffmann vd. 2020). Yaygın kullanım alanına sahip olan pyridaben her ne kadar pestisit kalıntısı bakımından araştırılmış olsa da bu etken maddenin mutajenitesi hakkında literatüre rastlanmamıştır.

Pestisitlerin sadece hedef organizmalar üzerinde değil aynı zamanda hedef olmayan canlılar üzerindeki olumsuz etkileri ve ekosisteme olan zararları dünya genelinde bilinen bir gerçektir. Son yıllarda insektisit ve akarisitlerin artan kullanımı Ames testi yoluyla hedef dışı canlılar üzerindeki potansiyel risk etkilerini göstermek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada tarımda sıklıkla kullanılan pyridaben etken maddesinin Ames/*Salmonella* mikrozom testi ile mutajenitesinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Suşları ve Kimyasallar

Deneyde, *Salmonella typhimurium* TA100 ve TA98 suşları uygulanmış (Maron ve Ames 1983) olup TA98 çerçeve kayması mutasyonlarına sebep olan mutajen ajanların, TA100 suşu ise baz çifti değişimine neden olan mutajen ajanların belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada %20 pyridaben aktif maddesi içeren Puzzle 20 WP'nin ticari preparatı Afyonkarahisar'da bitki koruma ürünleri bayisinden alınmıştır. Deney Sprague Dawley cinsi ratlardan alınmış olan karaciğer homojenatı ile S9 varlığında ve yokluğunda gerçekleştirilmiş olup S9 fraksiyonu ticari olarak temin edilmiştir (Sigma-Aldrich-S2067).

2.2.Metod

Puzzle 20 WP insektisit ve akarisitinin test dozları deney sırasında taze bir şekilde steril distile su ile hazırlanmış olup çalışmada bu pestisite ait altı ayrı doz (800, 400, 200, 100, 50 ve 25 µg/plak) uygulandı. Dean vd. (1985)'un çalışmasına göre sitotoksik doz belirlemesi gerçekleştirilmiş olup bunun için deney öncesinde bir ön

uygulama kuruldu ve bulunan değerler deney sırasında altı farklı doz şeklinde uygulandı. Çalışmada kullanılacak olan test suşları Mortelmans ve Zeiger (2000)'a göre belirlendi ve suşların genotipleri deneyin güvenilirliği açısından çalışma öncesi kontrol edildi. Mutant bakteri suşlarının spontan his- durumundan his+ durumuna dönüşmesi, belirli sınırlar içinde mümkün olup bu sınırlar; TA100 için 75-200 revertant/plak, TA98 için ise 25-50 revertant/plaktır. Bu çalışmadaki değerler ön çalışma sonucunda bu sınırlar içerisinde bulundu. Çalışma Ames standart plak inkorporasyon testi ile *Salmonella typhimurium* TA98 ve TA100 suşları kullanılarak metabolik aktivasyon yokluğunda ve varlığında olmak üzere iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiş olup bu deney Maron ve Ames (1983) metoduna göre uygunlandı. Çalışılmış olan her doz paralel 3 tekrarlı olacak şekilde planlandı ve birbirinden bağımsız iki ayrı deney gerçekleştirildi. Deney sırasında suşlara uygun olarak seçilen pozitif kontroller de uygulanmış olup çıkan değerler negatif kontrol ile kıyaslanıp mutajenite açısından değerlendirildi.

2.3. Spontan geriye dönüş sıklığının kontrolü

Spontan olarak geriye dönüş sıklığının kontrolü Mutant bakteri suşlarının kendiliğinden (spontan) his- durumundan his+ durumuna dönüşmesi, belirli sınırlar içinde mümkündür. Bu sınırlar TA 98 için 20-50 revertant/plak; TA 100 için 75-200 revertant/plaktır. Bu test için, 37 °C'de, NB'da büyütülen bir gecelik kültürden 0.1 ml alınıp, 45 °C'deki su banyosunda tutulan 0.25 ml 0.5 M histidin-biyotin solüsyonu içeren 2.5 ml top agar üzerine ilave edilmiştir. Daha sonra test tüpü yavaşça çalkalanarak MGA plaklarına yayılmış ve 37 °C'de 48-72 saat inkübe edilerek plaklarda üreyen koloniler sayılmıştır.

2.4.Sitotoksik Dozun Belirlenmesi

Uygulanan bileşiğin toksik olmayan dozları Dean ve arkadaşlarının (Dean vd. 1985) metoduna göre belirlendi ve sitotoksik olmayan 6 farklı konsantrasyon test edildi. Bu bileşiklerin, TA98 ve TA100 suşları için öldürücü dozunun saptanması amacıyla 2 ml top agara 100 µl bakteri kültürü ile 100 µl farklı dozlarda test maddesi ilave edildi. Tüplerdeki bu karışım 3 farklı nütrient agar plağına eklenerek plaklar 37°C'de lik bir inkübatörde 24 saatlik süre ile inkübasyona alındı. İşlem sonrası plaklarda üreyen ortalama koloni sayısı sayılarak negatif kontrol grubu ile kıyaslandı ve toksik olan ve olmayan konsantrasyonlar saptandı. Mutajenik aktivite çalışması sırasında toksik dozun altındaki dozlarla deney gerçekleştirildi.

2.5.Ames Plak İnkorporasyon Testi

Pyridaben aktif maddesinin mutajenik aktivitesini belirlemek için, *S. typhimurium*'un TA100 ve TA98 suşları kullanılarak S9 karışımı yokluğunda ve varlığında plak inkorporasyon metodu uygulandı (Maron ve Ames 1983). Pyridaben'in test konsantrasyonları (800, 400, 200, 100, 50 ve 25 µg/plak) Dean ve arkadaşları (1985)'na göre bir ön çalışmayla belirlendi. Suşlar, çalkalamalı inkübatörde 16 saat boyunca 37°C'de tutuldu. Uygulamaya paralel olarak pozitif kontroller de kullanıldı. S9 fraksiyonu olmayan analizler için su banyosunda (45°C) bekletilen ve 2 ml top agar olan deney tüplerine sırasıyla 100 µl bakteri suşları ve 100 µl pestisitin farklı dozları ilave edildi. Tüpler tek tek vortekslenip homojen şekilde dağılımları sağlanarak minimal glukoz agar plaklarına ekildi ve sıvının plak üzerine eşit bir şekilde dağılması sağlandı.

Ames testinde S9 fraksiyonu için yapılan deneyin ikinci aşamasında ise bu karışım içine 500 µl S9 karışımı eklendi ve petri üzerindeki sıvı karışım top agarla birlikte donduktan sonra 37°C'de 48-72 saat kadar inkübe edildi ve inkübasyonun sonunda geri dönen koloniler kaydedildi. Çalışma her pestisit konsantrasyonu için üç tekrarlı uygulandı ve iki ayrı uygulama tasarlandı ve sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilerek kontrol grubuyla kıyaslandı.

265.Verilerin İstatistiksel Analizi

Ames testinde pyridaben'in mutajenitesini değerlendirmek amacıyla yapılan çalışma sonunda istatistiksel analizler SPSS 18.0 for Windows paket programı ile Dunnett-t testi (2 yönlü) uygulanarak değerlendirildi ve verilerin ortalamaları arasındaki $p<0.05$ düzeyindeki farklılıklar da göz önünde bulunduruldu.

3. Bulgular

Ames testinin temeli, yapay mutasyonla histidin sentezleyemeyen *Salmonella typhimurium* suşlarının test bileşeninin ilavesi ile ikinci bir mutasyon geçirerek histidin sentezleyebilme yeteneği kazanması esasına dayanmaktadır (Ames vd. 1973, Flückiger-Isler vd. 2004). Ames testinde değerlendirme yapılırken uygulanan her doz negatif kontrol grubuyla kıyaslanır ve kontrol grubunun koloni sayısının iki katına çıkan değerler mutajenik şeklinde rapor edilir. Eğer sayılan koloniler doza bağlı bir şekilde artış gösterirse bu da uygulanan maddenin zayıf mutajenik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir (Mortelmans ve Zeiger 2000). Deneye ait Ames testi sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur. Çalışılan *Salmonella* suşlarının his- fenotipinden his+ fenotipine

dönüşmesi, yani histidin sentezleyebilme yeteneği belirli sınırlar içerisinde mümkündür. Bu çalışmaya ait sonuçlar kullanılan her iki suş için de bu değerler arasında saptanmıştır. Ayrıca çalışma öncesinde suşların mutant olup olmadığını tespit etmek amacıyla suşların genotip kontrolleri yapılmış ve test suşlarının orjinal mutasyonlara sahip olduğu belirlenmiştir. Ames (1973)'e göre mutant bakteri suşlarının kendiliğinden (spontan) his- durumundan his+ durumuna dönüşmesi, belirli sınırlar içinde mümkündür. Bu sınırlar TA 98 için 20-50 revertant/plak; TA 100 için 75-200 revertant/plaktır. Çalışmamızda elde ettiğimiz sayılar bu değerler arasındadır. Yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre TA 98 için ortalama revertant koloni sayısı S9 fraksiyonu varlığında 68.42±9.28, yokluğunda ise 42.15±3.14 bulunmuştur. TA 100 için ise ortalama revertant koloni sayıları S9 fraksiyonu varlığında 156.32±8.52 iken S9 fraksiyonu yokluğunda 72.33±7.25 olarak bulunmuştur. Revertant sayısındaki değişiklikler her iki suşun hem S9 fraksiyonu varlığında hem de yokluğunda kontrol grubuna göre azalmış olup bu azalmalar istatistiksel açıdan anlamlıdır.

Uygulanan tüm konsantrasyonlar hem TA98 hem de TA100 şuşlarında en yüksek dozda mutajenik etki göstermiş olup geri dönen koloni sayısındaki artış her iki suşta da doza bağlı olarak artış göstermiştir. Ayrıca, negatif kontrolde kendiliğinden geri dönen koloni miktarının, test materyalinin uygulanan tüm dozlarından daha az olduğu saptanmıştır. Ek olarak, pozitif kontrol plakları iki suşta da kendiliğinden mutasyon oranında önemli bir artışa neden olmuştur. Sonuç olarak Puzzle 20 WP'nin Ames testi ile uygulanan her iki suş için de 800 µg/plak dozlarında S9 fraksiyonu yokluğunda da varlığında da mutajenik aktiviteye sahip olduğu saptanmıştır.

Çizelge 1. Pyridaben aktif maddesinin *S. typhimurium* TA100 ve TA98 suşları ile S9 karışımı yokluğunda ve varlığında mutajenik aktivitesi

Madde	**Doz (µg/plak)**	**Revertant Sayısı Aritmetik Ortalama± Standart Sapma**			
		TA98		**TA100**	
		- S9	**+ S9**	**- S9**	**+ S9**
Pyridaben	800	98.42±5.45*	152.21±7.24*	164.32±8.21*	326.32±11.20*
	400	80.75±6.24	128.32±6.23	134.41±7.68	258.32±22.32
	200	79.31±4.10	125.35±4.42	132.60±3.44	248.41±10.29
	100	75.63±4.03	98.35±4.24	92.11±6.43	198.45±9.43
	50	54.24±3.58	84.22±3.51	85.42±5.65	181.15±8.21
	25	45.55±4.26	76.42±5.48	75.22±5.68	162.43±7.44
Negatif Kontrol (dH_2O)	100	42.15±3.14	68.42±9.28	72.33±7.25	156.32±8.52
SA	10			2825.45±42.15*	
2AA	5				2423.21±39.14*
2AF	200		1228.24±12.35*		
NPD	200	1441.22±34.52*			

*Kontrol grubuna göre revertant sayısı p<0,05 düzeyinde anlamlı) *:mutajen, NPD: 4-nitro-o-fenilendiamine, SA: Sodyum azid, 2AF: 2-aminofluorene, 2AA: 2-aminoanthracene

4. Tartışma

Tarımsal zararlıları kontrol etmek için pestisitlerin yaygın kullanımı, gıda zincirinde kalıntıların bulunmasına sebep olmakta ve tüketiciler bu kimyasalların düşük seviyelerine günlük olarak maruz kalabilmektedirler. Son zamanlarda, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), 2008 yılında Avrupa Birliği genelinde analiz edilen 67.887 gıda örneğinin %46.7'sinde pestisit kalıntılarının tespit edildiğini bildirmiştir (EFSA 2010). Son yirmi yılda yayınlanan birkaç epidemiyolojik çalışma, pestisitlerin insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini, pestisit kullanımı ile Hodgkin dışı lenfoma, lösemi ve çeşitli katı tümör tipleri gibi kanserler arasındaki olası bir ilişki de dahil olmak üzere öne sürmektedir. Bu etkilerin çoğu mesleki maruziyetlerle ilişkilendirilmektedir (Merhi vd. 2007, Weichenthal vd. 2010). Bununla birlikte, genel popülasyonda çok düşük dozda pestisitlere yaşam boyu maruz kalma ile benzer ilişkilerin olup olmadığı bilinmemektedir. Bunun yanı sıra pestisitlerin son yıllarda katlanarak piyasaya sunulması ve bilinçsiz bir şekilde kullanılması bu maddelerin mutajenik ve genotoksik açıdan herhangi bir etkiye sahip olup olmadıkları sorusunu akla getirmektedir. Bu bağlamda hedef dışı canlılar üzerindeki olumsuz etkilerini de incelemek amacıyla son yıllarda bu konuda çok fazla araştırma yapılmaktadır.

Ames testi, Dr. Bruce Ames tarafından literatüre kazandırılmış olan ve çeşitli kimyasal maddelerin

mutajenik aktivitelerinin araştırılmasında sıklıkla kullanılan, güvenilir, ekonomik, geçerliliği yüksek ve mutajen-karsinojen etkisi en iyi bilinen kısa sürede cevap veren bakteriyel test sistemlerinden biridir (Maron ve Ames 1983). Ames testinde, kimyasal maddelerin mutajenik etkilerini belirlemek için kullanılmak üzere *Salmonella typhimurium* LT2 atasal suşundan *in vitro* mutasyonlarla elde edilmiş bakteriyel mutantlar (TA98, TA100, TA102, TA1535 ve TA1537 gibi) kullanılmaktadır (Maron ve Ames 1983). Bu suşlarda histidin sentezlenmeden, büyüme ve koloni oluşumu gerçekleşemez. Suşlar şüpheli kimyasalla muamele edildikten sonra, histidin üretebilmekte ve koloni oluşturmak üzere büyümektedirler (Maron ve Ames 1983, Kumar et al. 2013). Çalışmada, pyridaben'in farklı dozlarıyla yapılan Ames testi, hem TA98 hem de TA100 suşlarında en yüksek doz olan 800 µg/plak konsantrasyonunda mutajenite göstermiştir. *S. typhimurium* TA98 suşu, hisD3052 alelinde -1 delesyonundan oluşan çerçeve kayması mutasyonlarına sahiptir. Bu alel, çerçeve kayması mutajenleri tarafından geri döndürülebilir. TA100 suşunda baz çifti değişimi sonucunda hisG46 aleli, vahşi tip CTC kodonu (prolin) yerine bir CCC kodonundan (lösin) oluşur. Bu mutasyon, G-C çiftlerinde baz değişimine neden olan mutajenler tarafından geri döndürülebilir (Di Sotto et al. 2008). Bu bakteriyel özellikler bağlamında, sonuçlara bakıldığında TA98 suşunda pyridaben'in mutajenitesinin çerçeve kayması mutasyonlarından, TA100 suşunun mutajenitesinin ise baz değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir (Di sotto vd. 2008).

Geçmişten günümüze pyridaben grubu pestisitler üzerinde farklı mikroorganizmalar ile çok sayıda çalışma yapılmıştır. Pyridaben'in *Escherichia coli* ile yapılan bir çalışmada DNA hasarı üzerinde hiçbir etki göstermediği saptanmıştır (Igarashi ve Sakamoto 1994). Laboratuvar çalışmaları pyridaben'e sürekli 48 ila 96 saatlik maruziyetin balıklar (*Lepomis macrochirus, Pimephales promelas, Oncorhynchus mykiss, Cyprinodon variegatus*) ve omurgasızlar (*Daphnia magna, Mysidopsis bahia*) için akut olarak toksik olduğunu göstermektedir. Pyridaben *Allium testinde ise* kök büyümesini ve mitotik indeksi istatistiksel olarak azaltarak sitotoksik etki, kromozom aberasyonları (bozulmuş ana-telofaz, kalgın kromozom, yapışıklık, köprü ve poliploidi) ve DNA hasarını istatistitiksel olarak artırarak genotoksik etki göstermiştir (Liman 2019). Dönbak (2017) yaptığı bir çalışmada insan periferal lenfositlerinde pyridaben'in 40, 20, 10 ve 5 µg/mL dozlarını çalışmış ve bu dozların kardeş kromatid değişimini, kromozom aberasyonlarını ve mikronükleus oluşumunu tetiklediğini ve bu dozlarda genotoksik etki gösterdiğini saptamıştır (Dönbak 2017). Bir başka çalışmada ise pyridaben'in EW36 ve ST486hücre hatları üzerinde apoptozisi indüklediği tespit edilmiştir (Bloom vd. 2005). Audenaert vd. (2014) yaptıkları çalışmada, sentetik piretroitli bileşiklerin akarlara karşı çok toksik olduğunu pyridaben'in ise daha az zararlı olduğunu bildirmişlerdir. EFSA (2010)'ya göre ise pyridaben'in nörotoksik, karsinojenik, genotoksik ya da üreme açısından toksisite göstermediği rapor edilmiştir. Igarashi ve Sakamoto (1994) yapılan akut çalışmalar sonucunda pyridabenin orta ila düşük toksisiteye sahip olduğunu rapor etmişlerdir. N27 hücrelerine uygulanan pyridaben'in reaktif oksijen seviyelerinin (ROS) oluşumunu indüklediği (Charli vd. 2016), Balb/C fareleri ile yapılan bir çalışmada DNA hasarını artırmasının yanı sıra yine kromatin anormalliklerine de neden olduğu (Manas vd. 2013a), ayrıca ROS seviyelerini (Manas vd. 2013b, 2014) de istatistiksel bakımdan artırdığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler literatüre uyumlu bulunmuş olup pyridaben yüksek dozlarda kullanıldığında mutajenik aktivite göstermektedir. Tüm bu çalışmalar sonucunda pyridaben'in oluşturduğu DNA hasarının mitokondriyal elektron taşıma zincirindeki Kompleks I'in inhibe edilerek ROS seviyesinin artış göstermesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir (ST-Pierre vd. 2002, Chen vd. 2003).

S. typhimurium TA 98 suşu ile yapılan çalışmada uygulanan tüm dozların S9 varlığında elde edilen ortalama revertant koloni sayılarının S9 yokluğundaki revertant koloni sayılarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuca TA 100 suşu ile yapılan çalışmalar sonucunda da rastlanılmıştır. Buna dayanarak test edilen maddenin de canlı vücuduna girdiğinde metabolik reaksiyonlar sonucu oluşan metabolitlerinin DNA ile etkileşimini bir miktar artırdığı düşünülebilir ancak mutajenite açısından yine de çok büyük bir fark oluşturmamıştır. Ayrıca düşük dozdan yüksek doza doğru giderken doza bağlı bir artış gözlenmiş ve bu artışın en yüksek doz olan 800 µg/plakta mutajenik aktivite gösterdiği tespit edilmiştir.

Kimyasal maddelerin genotoksik etki gösterip göstermemeleri çeşitli etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle test materyalinin bakteri hücre duvarını aşmış olması doğrudan DNA ile etkileşime gireceğini gösteren bir parametre değildir. Bileşik sitoplazma içine girse bile bakteri genomunda bulunan spesifik bağlanma bölgeleriyle bir bağlantı sağlayamayabilir. Bu nedenle, bileşik hücre içerisine girmiş olsa bile DNA ile etkileşim gerçekleşmeyebilir

(Kayaalp 1995). Bu durumda DNA ile bağlantıya geçmemiş bir ajanın mutajenitesinden bahsedilemez. Ayrıca uygulanan test bileşeninin kimyasal yapısı da hücre içerisine girdikten sonrası için önemlidir. Kimyasal maddelerin yapısında bulunan halkalar, yan zincirler, bağlanma konumları, kimyasal maddenin niteliği, grup sayıları ve pozisyonları mutajenik aktivitenin değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir (Öztaş 2005). Aynı zamanda pestisitlerin vücuda giriş yolları, yağda çözünürlük oranı, pestisite temas süresi ve maddenin vücutta hidroliz olma kapasitesi gibi birçok neden de toksisite üzerinde belirleyici etkiye sahiptir (Namba vd. 1972; Vural 1996). Tüm bu parametreler göze alındığında bir maddeye mutajenik denilebilmesi için birçok değerin gözden geçirilmesi gerektiği kaçınılmazdır.

Sonuç olarak, çalışmada pyridaben'in Ames testi ile mutajenik aktivitesi araştırılmış olup hem TA98 hem de TA100 suşu ile yapılan uygulamalarda S9 fraksiyon varlığı ve yokluğunda bu maddenin yüksek dozlarda mutajenik olduğu tespit edilmiştir. Ames testi sadece bir bakteriyel test sistemi değil aynı zamanda S9 fraksiyonu ile birlikte ökaryotik canlılar üzerinde de fikir sahibi olabileceğimiz bir yöntem olması açısından oldukça güncel bir metottur. Pestisitler sadece hedef değil, hedef olmayan organizmalar üzerinde de etkinliğini gösterdiğinden dolayı bu kimyasal maddelerin toksisite değerlendirilmelerinin yapılması önem arz etmektedir. Bu bağlamda bu maddenin Ames testi ile mutajenitesi belirlenmiş olmakla beraber diğer test metotlarıyla da toksik açıdan değerlendirilmesi piyasaya sunulmadan önce güvenilir sonuçlar vermesi açısından önemlidir. Zira ürünler, dikkatli bir şekilde ve uygun şekilde kullanıldığı takdirde, kullanıcıların ve tüketicilerin güvenliği açısından endişe kaynağı olarak kabul edilmemektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar: Araştırma, Kavramsallaştırma, Deneysel tasarım, Analiz ve yorumlama, Kaynak sağlama, Yazma/orijinal taslak, Yazma/inceleme ve düzenleme, Görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı
Bu makale ile ilgili çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışmada analiz edilen ve elde edilen tüm değerler yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Akyıl, D., 2021. Potential mutagenicity of Udimo 75 WG herbicide in *Salmonella typhimurium* with Ames test. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, **21,** 1016-1021. https://doi.org/10.35414/akufemubid.891586

Ames, B.N., Lee, F.D. and Durston, W.E., 1973a. An improved bacterial test system for the detection and classification of mutagens and carcinogens. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A*, **70**, 2281-2285. https://doi.org/10.1073/pnas.70.3.782

Audenaert, J., Vissers, M. and Gobin, B., 2014. Testing side-effects of common pesticides on *A. swirskii* under greenhouse circumstances. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, **79(2),** 207-210.

Bae, H., You, S., Lim, W. andSong, G., 2021. Pyridaben leads to inhibition of cell growth and induction of cell death through intracellular mechanisms in early pregnancy. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **171,** 104733. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104733.

Balkan, T., and Kara, K. 2022. Determination of pesticide residues and risk assessment in some vegetables grown in Tokat province. *Plant Protection Bulletin*, ***62*(2),** 26-35.

Bloom, S.E., Lemley, A.T. and Muscarella, D.E., 2005. Potentiation of apoptosis by heat stress plus pesticide exposure in stress resistant human B-lymphoma cells and its attenuation through interaction with follicular dendritic cells: role for c-Jun N-terminal kinase signaling. *Toxicological Sciences*, **89**, 214-223.

Bose, A. and Beal, M.F., 2016. Mitochondrial dysfunction in Parkinson's disease. *Journal of Neurochemistry*. **139**, 216-231.

Charli, A., Jin, H., Anantharam, V., Kanthasamy, A. and Kanthasamy, A.G., 2016. Alterations in mitochondrial dynamics induced by tebufenpyrad and pyridaben in a dopaminergic neuronal cell culture model. *Neurotoxicology*, ***53*,** 302-313.

Chen, Q., Vazques, E.J., Moghaddas, S., Hoppel, C.L. and Lesnefsky, E.J., 2003. Production of reactive oxygen species by mitochondria: Central role of complex III. *Journal of Biological Chemistry*, **278**, 36027–36031.

Chen, L., Cai, E., Guo, J. and Yang, S., 2011. Dissipation dynamics of residual pyridaben in bananas and soils. Modern Agrochemistry, **10(5),** 40-43.

Dean, B.J., Brooks, T.M., Hodson-Walker, G. and Hutson, D.H., 1985. Genetic toxicology testing of 41 industrial chemicals. *Mutation Research*, **153**, 57-77.

Di Sotto, A., Evandri, M.G., Mazzanti, G., 2008. Antimutagenic and mutagenic activities of some terpenes in the bacterial reverse mutation assay. *Mutation Research*, **653**,130-133.

Döker, İ. ,Kazak, C., 2020. Toxicity and risk assessment of acaricides on the predatory mite, *Euseius scutalis* (Athias-Henriot) (Acari: Phytoseiidae) under laboratory conditions. *Chemosphere,* **261,** 127760.

https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127760

Dönbak, D.B., 2017. İnsan periferal lenfositlerinde pyridaben insektisitinin ka, kkd ve mn testleri ile genotoksisitesinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 88.

EFSA, 2010. Annual Report on Pesticide Residues according to Article 32 of Regulation (EC) n◦ 396/2005.

European Food Safety Authority, 2010. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance pyridaben. EFSA J. **8,**1632. https://doi.org/10. 2903/j.efsa.2010.1632.

Fluckiger-Isler, S., Baumeister, M., Braun, K., Gervais, V., Hasler- Nguyen, N., Reimann, R., Van Gompel, J.,. Wunderlich, H.G. and Engelhardt, G., 2004. Assessment of the performance of the Ames II assay: a collaborative study with 19 coded compounds. *Mutation Research*, **558**, 181-197.
https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2003.12.001.

Gomez, C., Bandez, M.J. and Navarro, A., 2007. Pesticides and impairment of mitochondrial function in relation with the parkinsonian syndrome. Frontiers in Bioscience, **12,** 1079. https://doi.org/10.2741/2128.

Igarashi, H. and Sakamoto, S., 1994. Summary of toxicity studies with pyridaben, *Journal of Pesticide Science*, **29,** 243-251. https://doi.org/10.1584/jpestics.19.4_S243

Kanbolat, M., Balkan, T. and Kara, K., 2023. Verification of QuEChERS method for the analysis of pesticide residues and their risk assessment in some fruits grown in Tokat, Turkey. *Journal of Agricultural Sciences*, ***29*(2)**, 573-588. https://doi.org/10.15832/ankutbd.1122538

Kauffmann, K., Gremm, L., Brendt, J., Schiwy, A., Bluhm, K., Hollert, H. and Büchs, J., 2020. Alternative type of Ames test allows for dynamic mutagenicity detection by online monitoring of respiration activity. *Science of the Toral Environment,* **726,** 137862. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137862.

Kayaalp, O. 1995. Tıbbi Farmakoloji. Hacettepe Taş Yayınları, Ankara.

Kumar, A., Sharma, K., Tomar, M., Malik, V. and Kataria, S.K., 2013. Determination of mutagenic potential of imidacloprid in *Salmonella typhimurium*–TA 98 and TA 100 following bacterial reverse mutation assay. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research,* **4(7),** 2231-1238.

Liman, R., 2019. % 20 Pyridaben İçeren Primite 20 WP'nin Allium cepa Kök Meristematik Hücrelerine Üzerine Sitotoksik ve Genotoksik etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, ***19*(1),** 5-14. https://doi.org/10.35414/akufemubid.503565

Ma, H., Zhang, S., Zhang, D., Chen, Y., Zheng, Z. and Qian, X., 2007. Residues dynamics of pyridaben in apple and soil. Journal of Hebei Agricultural Sciences, **11(1),** 108-110.

Ma, J.Z., Huang, Y., Jiang, P., Liu, Z., Luo, Q., Zhong, K.Y., Yuan, W., Meng, Y. and Lu, H., 2021a. Pyridaben induced cardiotoxicity during the looping stages of zebrafish (*Danio rerio*) embryos. AquaticToxicology, **237,** 105870. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105870.

Manas, G.E., Hasanzadeh, S. and Parivar, K., 2013b. The effects of pyridaben pesticide on the histomorphometric, hormonal alternations and reproductive functions of BALB/c mice. *Iranian journal of Basic Medical Sciences*, **16,** 1055-1064.

Manas, G.E., Hasanzadeh, S., Najafi, G., Parivar, K. and Yaghmaei, P., 2013a. The effects of pyridaben pesticide on the DNA integrity of sperms and early *in vitro* embryonic development in mice. *Iranian Journal of Reproductive Medicine*, **11**, 605-610.

Manas, G.E., Parivar, K., Hasanzadeh, S., Yaghmayi, P. and Najafi, G., 2014. The effects of pyridaben pesticide on gonadotropic, gonadal hormonal alternations, oxidative and nitrosative stresses in Balb/C mice strain. *Comparative Clinical Pathology,* **23**, 297-303.

Maron, D.M. and Ames, B.N., 1983. Revised methods for the *Salmonella* mutagenicity test. *Mutation Research,* **113**, 173-215. https://doi.org/10.1016/0165-1161(83)90010-9

Merhi, M., Raynal, H., Cahuzac, E., Vinson, F., Cravedi, J.P. and Gamet-Payrastre, L., 2007. Occupational exposure to pesticides and risk of hematopoietic cancers: meta-analysis of case–control studies. *Cancer Causes Control,* **18,** 1209–1226.

Mortelmans, K. And Zeiger, E., 2000. The Ames *Salmonella*/microsome mutagenicity assay. *Mutation Research*, **445**, 29–60. https://doi.org/10.1016/S0027-5107(00)00064-6

Moulas, C., Petsoulas, C., Rousidou, K., Perruchon, C., Karas, P. and Dimitrios, G.K., 2013. Effects of systemic pesticides Imidacloprid and Metalaxyl on the phyllosphere of pepper plants. *BioMed Research International*, **8**. https://doi.org/10.1155/2013/969750

Namba, T., Nolte, C., Jackrel, J. and Grob, D. 1972. Poisoning due to organophosphate insecticides, acute and chronic manifestations. *The American Journal of Medicine,* **50,** 475-492. https://doi.org/10.1016/0002-9343(71)90337-8

Özkara, A., 2017. Evaluation of Siperkor pesticide mutagenicity with Ames test. *Afyon Kocatepe*

University Journal of Sciences and Engineering, **17(2),** 393-398. https://doi.org/10.5578/fmbd.59768.

Özkara, A., 2022. Assessment of Mutagenic Activity of Karate Zeon Pesticide by Ames Test. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering***, 22**, 465-469. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1069842.

Öztaş, E., 2005. Bazı 9-sübstitüe Fenantren Türevlerinin Mutajenik Aktivitelerinin Ames/*Salmonella*/ Mikrozom Testi ile Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 74.

Rand, G.M., and Clark. J.R., 2000. Hazard/risk assessment of pyridaben: I. Aquatic toxicity and environmental chemistry. *Ecotoxicology,* **9**, 157-168. https://doi.org/10.1023/A:1008934502348.

ST-Pierre, J., Buckingham, J.A., Roebuck, S.J. and Brand, M.D., 2002. Topology of superoxide production from different sites in the mitochondrial electron transport chain. *Journal of Biological Chemistry*, **277**, 44784–44790. https://doi.org/10.1074/jbc.M207217200

Vural, N., 1996. Toksikoloji. Ankara Üniversitesi Basımevi, Ankara, 344-363.

Weichenthal, S., Moase, C. and Chan, P., 2010. A review of pesticide exposure and cancer incidence in the Agricultural Health Study cohort. *Environmental Health Perspectives*, **118**, 1117–1125. https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000100028

World Health Organization., 2020. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification, 2019.

Yu, S.J., 2008. The toxicology and biochemistry of insecticides. CRC Press, Taylor and Francis group, New York, ISBN. 25-85.

Zhang, X., Shang, H., Chen, J. And Wu, D., 2005. Studies on the dynamic variation of pyridaben residues in citrus and soil. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences,* **18 (6)**, 777-781.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1584459
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041002 (712-719)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041002 (712-719)

Investigation of the Usability of Polymeric Nanoparticle-Based Transfection Agent for CRISPR/CAS9 in HUVEC Cell Line

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 13.11.2024
Kabul/Accepted: 25.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

HUVEC Hücre Hattında CRISPR/CAS9 için Polimerik Nanopartikül Tabanlı Transfeksiyon Ajanının Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Rizvan İMAMOĞLU[1*], Özlem KAPLAN[2], Mehmet Koray GÖK[3], İsa GÖKÇE[4]

[1] *Bartın University, Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, Bartın, Türkiye*
[2] *Alanya Alaaddin Keykubat University, Rafet Kayış Faculty of Engineering, Dept. of Genetics and Bioengineering, Antalya, Türkiye*
[3] *İstanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Istanbul, Türkiye*
[4] *Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Basic Pharmaceutical Sciences, Tokat, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

Genome editing technology is a promising, popular technology for diagnosing and treating many diseases. One of the most popular techniques utilized in genome editing research nowadays is the CRISPR/Cas system. The CRISPR/Cas system holds considerable potential for diagnostic and therapeutic applications due to its ease of use, speed, and affordability. The safe and effective delivery of the CRISPR-based genome editing system to the intended human body cells is one of the system's problems. This study investigated the silencing of the COX-2 gene via the CRISPR/Cas system using a PβAE-based transfection agent in the HUVEC cell line. Western blot analysis was performed to confirm COX-2 gene silencing in the HUVEC cell line, and the effects of COX-2 gene silencing on cell migration in these cells were examined. As a result, the transfection efficiency of the PβAE-based transfection agent for the HUVEC cell line was determined as 90-95%, and the CRISPR efficiency was calculated as 57.12% based on the Western blot results. It was revealed that the PβAE-based nanoparticles used in this study can be used as a good transfection agent in CRISPR/Cas-mediated genome editing in the HUVEC cell line, especially in plasmid transfection.

Keywords: CRISPR, Genom Editing, HUVEC Cell Line, Transfection

Öz

Genom düzenleme teknolojisi birçok hastalığın teşhisi ve tedavisi için umut vadeden, popüler bir teknolojidir. Günümüzde genom düzenleme araştırmalarında kullanılan en popüler tekniklerden biri CRISPR/Cas sistemidir. CRISPR/Cas sistemi, kullanım kolaylığı, hızı ve uygun fiyatı nedeniyle teşhis ve tedavi uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptir. CRISPR tabanlı genom düzenleme sisteminin amaçlanan insan vücudu hücrelerine güvenli ve etkili bir şekilde iletilmesi, sistemin sorunlarından biridir. Bu çalışma, HUVEC hücre hattında PβAE tabanlı bir transfeksiyon ajanı kullanılarak CRISPR/Cas sistemi aracılığıyla COX-2 geninin susturulmasını araştırdı. HUVEC hücre hattında COX-2 geninin susturulmasını doğrulamak için Western blot analizi yapıldı ve COX-2 geninin susturulmasının bu hücrelerdeki hücre göçü üzerindeki etkileri incelendi. Sonuç olarak, HUVEC hücre hattı için PβAE bazlı transfeksiyon ajanının transfeksiyon etkinliği %90-95 olarak belirlendi ve Western blot sonuçlarına göre CRISPR etkinliği %57,12 olarak hesaplandı. Bu çalışmada kullanılan PβAE bazlı nanopartiküllerin, özellikle plazmid transfeksiyonunda, HUVEC hücre hattında CRISPR/Cas aracılı genom düzenlemede iyi bir transfeksiyon ajanı olarak kullanılabileceği ortaya konuldu.

Anahtar Kelimeler: *CRISPR, Genom Düzenleme, HUVEC Hücre Hattı, Transfeksiyon*

1. Introduction

Genome editing involves technologies that allow scientists to alter an organism's genetic material. Thanks to these technologies, target-specific changes in genetic material can be achieved. Various methods for genome editing have been developed so far. The most common of these methods are transcriptional activator-like effector nucleases (TALENs), zinc finger nucleases (ZFNs), and regularly interspaced short palindromic repeat (CRISPR)/CRISPR-associated nuclease 9 (Cas9)(Gaj et al. 2013; Hosur et al. 2023). Among these, the recently discovered CRISPR/Cas-mediated genome editing method allows for more effective, straightforward, cheaper, and faster changes in genetic material (Hryhorowicz et al. 2023). The CRISPR/Cas9 system was first discovered in the bacterial immune system. Scientists have observed repetitive CRISPR sequences in the bacterial genome, where "intermediate" DNA sequences exist between the repeats that match the viral sequences exactly. Later, when reencountering the virus, it was discovered that bacteria copied these DNA elements into

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Rizvan İMAMOĞLU e-posta/e-mail: rimamoglu@bartin.edu.tr

RNA. This RNA, called guide RNA, provides immunity against the virus by directing a nuclease (a protein that cuts DNA) to its target to cut the viral DNA. Nucleases used to cut DNA are called Cas proteins (Zhang et al. 2014). This study aims to characterize the Poly-β-amino ester (PβAE) based transfection agent for CRISPR applications and to investigate the transfection efficiency in the HUVEC cell line for genome editing study.

In the last five years, scientists have realized the therapeutic potential of the CRISPR/Cas9 genome editing system against diseases, and they have paved the way for intensive work on the CRISPR/Cas9 genome editing system (Khoshandam et al. 2024). The first clinical studies using CRISPR/Cas9 were carried out in 2016. These studies showed that CRISPR/Cas9 held great promise for treating diseases with genetic disorders and creating disease models (Baylis and McLeod, 2017).

Nevertheless, akin to the challenges encountered with gene therapy and other therapies based on nucleic acids, CRISPR/Cas9 must contend with issues such as unintended effects at sites other than the target, the absence of secure and effective methods for delivery, and ethical concerns, all of which pose obstacles to its therapeutic use in humans. (Liu et al. 2017).

In plasmid-based systems studies, off-target effects can arise during CRISPR/Cas9-mediated gene editing (Guo et al. 2023). These consequences may result in epigenetic alterations, genomic instability, and disruption of gene functioning. Off-target effects result from the Cas9/sgRNA complex binding to regions away from the PAM (Protospacer Adjacent Motif) region. Given that sgRNA is designed to target a specific 20-base pair (bp) sequence of DNA, there is a possibility of encountering similar sequences elsewhere in the human genome. This raises concerns about off-target effects, which can pose challenges for using sgRNA in therapeutic settings involving humans. To mitigate potential off-target effects of the CRISPR/Cas9 system, strategies such as using a paired Cas9 nickase, carefully designing sgRNAs, and selecting the targeting site correctly are being considered. Choosing the appropriate delivery system and CRISPR/Cas9 type for carrying the genetic cargo can also help reduce off-target effects. Non-viral delivery methods are typically associated with fewer off-target effects than viral delivery systems (Liu et al. 2013).

Finding secure and efficient delivery systems to successfully implement CRISPR/Cas9 in clinical settings is important. The transportation of CRISPR/Cas9 systems to specific tissues or cells within the human body is a significant challenge, and various delivery systems have been used recently to address this obstacle.(Kang et al. 2017). The methods used to deliver CRISPR/Cas9 systems are like those used for nucleic acids and proteins for the past thirty years. For example, delivering plasmid-based CRISPR/Cas9 systems is like delivering plasmid-based gene therapy. Vectors designed for gene therapy, whether viral or non-viral, can be used for plasmid-based CRISPR/Cas9 systems without needing additional adjustments. While delivering Cas9 messenger RNA (mRNA) and sgRNA may seem complex, it is similar to delivering small interfering RNA (siRNA). This means that delivery systems created for siRNA can be repurposed to transport Cas9 mRNA and sgRNA with minimal changes. (Tao et al. 2019). The Cas9 protein/sgRNA ribonucleoprotein complex's delivery method is unique due to its positive charge of the Cas9 protein, distinguishing it from current nucleic acid delivery systems. Different techniques have been developed to alter the Cas9 protein to form a stable complex with sgRNA and non-viral vectors (Kuhn et al. 2020). The obtained nanoparticles In-depth research on the CRISPR/Cas9 system continues to develop safe and efficient delivery systems for CRISPR/Cas9-based therapeutics (Nie et al. 2022; Zhou et al. 2024).

The biodegradability of PβAEs reduces the risk of long-term toxicity and accumulation in cells and tissues (Anderson et al. 2008; Mirón-Barroso et al. 2022; Wang et al. 2024). Furthermore, their structure can be easily modified using different monomers, optimizing them for specific gene delivery needs (Lynn and Langer, 2000a). PβAE-based agents show high efficiency and low toxicity in gene delivery (Anderson et al. 2005; İmamoglu et al. 2022). Furthermore, PβAEs have low immunogenicity, meaning they are unlikely to be recognized by the immune system and cause a reaction (Karlsson et al. 2020a). These features make PβAEs an attractive and safe option in gene therapy applications.

COX-2 is an enzyme which belongs to the prostaglandin G/H synthase family. It comprises 604 amino acids and has a molecular weight of 68.996 kDa. The COX-2 enzyme acts as a dioxygenase and peroxidase, catalyzing the conversion of arachidonic acid to prostaglandin H2. This conversion is the rate-limiting step in producing prostaglandins (PGs) and thromboxane A2 (TXA2).(Rouzer and Marnett, 2009). COX-2 is a potent mediator of inflammation and plays a role in activity-dependent plasticity in prostanoid signaling. COX-2 enzyme is expressed in endothelial cells (Liu et al. 2018). It is an enzyme that can be activated and has crucial roles in various pathological processes, such as inflammation, angiogenesis, and tumorigenesis. (Ricciotti and Fitzgerald, 2011). Angiogenesis is the new blood vessel formation process in existing vasculature, which occurs continuously in both health and disease. (Auerbach et al. 2003). Human umbilical cord vein endothelial cells (HUVEC) are commonly used to study vascular biology in the lab. COX-2, an enzyme,

can stimulate the production of prostaglandins, which in turn can increase the expression of VEGF in tumor cells. This suggests that COX-2 may create a positive feedback loop between tumor cells and endothelial cells during forming new blood vessels (angiogenesis). Blocking COX-2 could disrupt this feedback loop and potentially inhibit the growth of tumors that depend on angiogenesis. (Wu et al. 2006).

In this study, the efficiency and biocompatibility of polymeric nanoparticle-based transfection agents to deliver CRISPR/Cas9 system to HUVEC cell lines were evaluated. The findings showed that polymeric nanoparticles could be an alternative to traditional methods for safely and effectively delivering CRISPR/Cas9 system to endothelial cell lines. Transfection efficiency, intracellular targeting success and cytotoxicity profile were comprehensively analyzed.

2. Materials and Methods

2.1 Procurement and Preparation Plasmids

PX601-GFP plasmid (84040) was obtained from addgene. To knock out the COX-2 gene sequence, a ready-made vector named Cox-2 Double Nickase Plasmid (h) and coded sc-400072-NIC, commercially offered by Santa Cruz, was used. Plasmid PX601-GFP was transformed into *E.coli* DH5alpha cells and purified from the grown cells by using an endotoxin-free kit(Kuduğ et al. 2019; Kaplan et al. 2021).

2.2. Cell Culture

To investigate the effect of the prepared PβAE-based transfection agent on human umbilical cord endothelial cells (HUVEC) and to use it in transfection studies, the cells were grown in DMEM-High glucose medium (Dulbecco's Modified Eagle Medium) at 37°C in a humid environment containing 5% CO2. The growth of the cells was examined with an inverted microscope during the 24–48-hour incubation period (Kaplan et al. 2021).

2.3. Polymer synthesis

The transfection agent polymer used in this study is a system patented by Gök et al. (2022) For the synthesis of a PβAE-based transfection agent, diacrylate and diamine were used as monomers. The reaction was carried out in a fume hood by passing nitrogen. After synthesis, the polymer was kept in a vacuum oven for three days to remove the ether (Gök et al., 2022).

2.4. Preparation of nanoparticulate carrier systems using PβAE polymer

2 mg of the synthesized polymer was taken and dissolved in 2 mL DMSO. To prepare PβAE-based transfection agent and determine the resulting nanoparticles' size, plasmid-free nanoparticles were first prepared using the nanoprecipitation method. Various volumes of polymer solution were added dropwise into cold ultrapure water and quickly vortexed. PBAE nanoparticles were directly used for applications. The obtained nanoparticles particle size distribution, zeta potential, and particle size values were determined (Gök et al. 2022).

2.5. Zeta Potential and Particle Size Analysis

Zeta potential and particle size of the synthesized PβAE-based transfection agent were determined with a zetasizer (Horiba) device.

2.6. Transfection of PX601 plasmid with PβAE-based transfection agent synthesized into HUVEC cells

One 6-well plate was used for the transfection process. According to the ratio determined based on the agarose gel result (7:1), nanopolymer and plasmid were treated in a microcentrifuge tube for 30 minutes. Then, 45.5 µL of transfection medium, purchased from Santa Cruz (sc-108062), was added dropwise to the microcentrifuge tube, and vortexing was performed. Plasmid and nanoparticle mixture was slowly deposited from the wall of the plate onto the HUVEC cells prepared the day before and 500 µL of transfection medium was added to the plate well and incubated for 4 hours. After 4 hours, 2 ml of HUVEC medium containing FBS was added to the wells. After 24 hours, the medium was withdrawn from the medium, and 3 ml of fresh medium was added. After 48-72 hours, the medium in the wells was withdrawn and washed with PBS. Then, imaging was performed with a fluorescence microscope.

2.7. Analysis of transfection rate with the ImageJ program

Analysis of HUVEC cells co-transfected with the PβAE-based transfection agent producing different amounts of px601-GFP plasmid was performed using LEICA invert-fluorescence microscopy. The area where the cells to be examined were located was photographed using light and fluorescence filter mode. Then, using the ImageJ program and the cell counting tab, the proportions of cells counted in the same area with normal light and fluorescence light images were calculated as percentages relative to each other.

2.8. Performing the transfection process with a PβAE-based transfection agent synthesized into HUVEC cells

2 mg of the synthesized PβAE-based transfection agent was taken and dissolved in 2 mL DMSO. Then, the plasmid that would knock out the Crispr-Cox-2 gene was converted into a concentration of 1 µg/mL, and the plasmid DNA and PβAE-based transfection agent were treated in a dark environment in a microcentrifuge tube for 30 minutes. Following this, the nanoprecipitation process was started, and this process was carried out via a vortex. The processes for cell transfection were repeated as in method 2.6 repeated.

2.9. Western blot Analysis

Protein isolation was performed from HUVEC cells transfected and untransfected with the Santacruz Double Nickase plasmid. The isolation process was carried out using RIPA buffer. Primary and secondary antibodies used in Western blotting were Cox-2 (Abcam-ab52237), β-actin (Abcam-ab119716), and Goat anti-rabbit IgG H&L (HRP(Abcam-ab205718)).

2.10. Cell migration analysis

For proliferation analysis, cells were planted in two 6-well cell culture plates at 105 cells/well, with and without cox-2 gene knock-out. When the cells became confluent, a line was drawn in the middle of the wells with a 200 µL pipette tip. Thus, a standard in-vitro wound model was created. Then, the cells were incubated at 37°C in a 5% CO_2 environment, and cell migration was observed and photographed with a microscope at the 0^{th}, 24^{th}, and 48^{th} hours. Experiments were performed as two repetitions and wound closure rates were determined using the ImageJ program (Songur et al., 2020).

2.11. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using GraphPad Prism 8.01 software and comparable datasets. Probability values of $p<0.05$ were considered statistically significant. Differences between the groups were analyzed using one-way ANOVA and two-way ANOVA tests.

3. Results and Discussions

3.1. Zeta Potential and Particle Size Analysis

Size and zeta potential optimization studies of the PβAE-based transfection agent were carried out. Results revealed that the ratio of 200 µL PβAE to 1300 µL dH2O was the most optimum ratio for carrying out the study. The results are given in Table 1. It was determined that the zeta potential was 54.1 mV, and the particle size was 60.40 nm. Zeta potential and particle size analysis of plasmid-loaded nanoparticles (Cox-2 Double Nickase Plasmid (h)) are presented in Figure 1 and Table 1.

Table 1. Effect of PβAE on size and zeta potential of treatment with different solvent amounts" was conducted with three replicates for each condition.

PβAE-dH_2O(µL)	Particle Size (nm)	PDI	Zeta Potential (mV)
50-1450	53.9±0,1	0.264±0.018	+1±0.1
100-1400	55.0±0.3	0.204±0.001	+27.1±2.5
150-1350	57.5±1.1	0.180±0.047	+3±0.2
200-1300	60.4±2.8	0.151±0.016	+54.1±4.1
250-1250	64.5±0.3	0.189±0.006	+60.5±3.2
300-1200	70.5±1.2	0.184±0.039	+6±0.3
350-1150	72.6±1.0	0.180±0.03	+29.2±0.5
400-1100	73.9±0.3	0.176±0.015	+48.6±2.6
450-1050	77.3±0.3	0.200±0.047	+37.7±3.5
500-1000	81.0±0.6	0.186±0.02	+28.1±1.1
600-900	106.9±0.9	0.184±0.002	+16.9±3.5

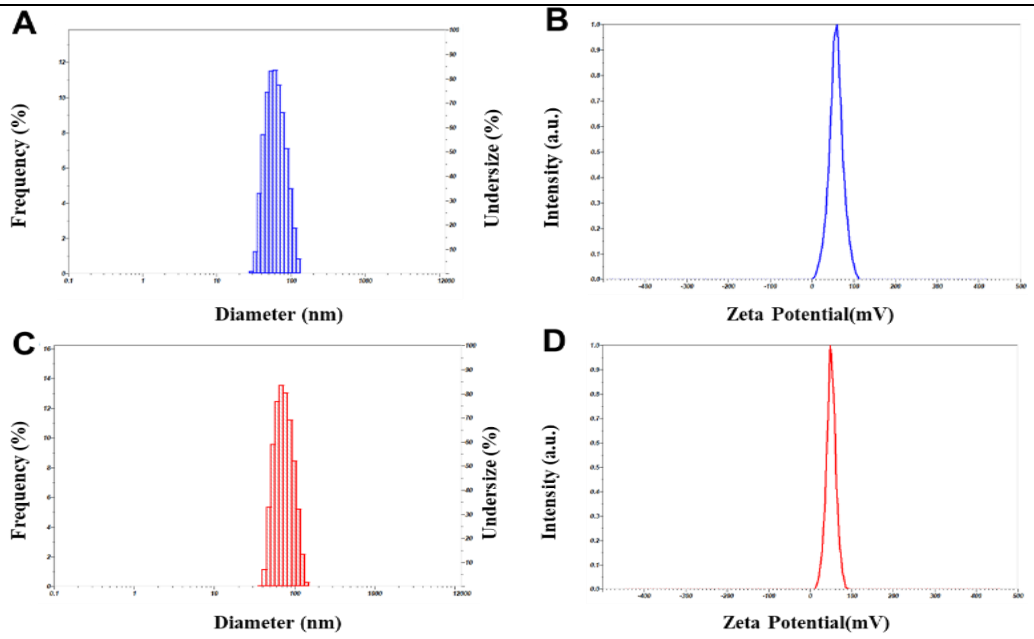


Figure 1. Particle size and zeta potential of PβAE used in the transfection process, A) Particle size of empty PβAE, B) Zeta potential of empty PβAE C) Particle size of PβAE interacted with plasmid, D) Zeta potential of PβAE interacted with plasmid

Table 2. Particle size and zeta potential of PβAE interaction with plasmid and its empty state

	No Plasmid	Plasmid Loaded
Size (nm)	60.4±2.8	71.2±3.2
PDI	0.151±0.016	0.161±0.018
Zeta (mV)	+54.4±4.1	+50.5±1.2

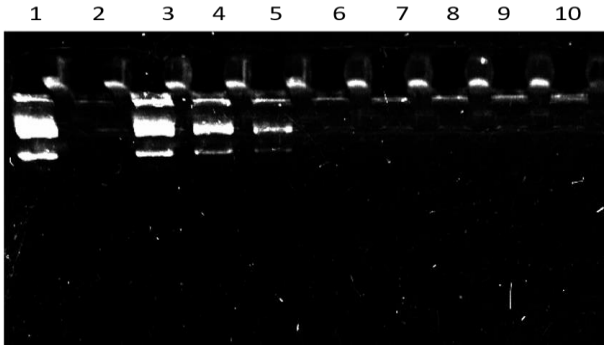


Figure 2. Retention capacity of the polymer 1st well plasmid DNA, 2nd well-synthesized polymer, 3rd well 2 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 4th well 3 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 5th well 5 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 6th well 7 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 7th well 10 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 8th well 12 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 9th well 15 µL polymer 1 µLplasmid DNA, 10th well 17 µL polymer 1 µLplasmid DNA

3.2. Plasmid Retention Capacity of the Synthesized Nanopolymer

The plasmid retention capacity of the nanopolymer is shown in Figure 2 as a result of agarose gel electrophoresis. According to agarose gel electrophoresis, it was determined that the nanoparticle prepared using 7 µL of polymer and 1 µL of plasmid DNA retained all of the plasmid DNA and was the most ideal ratio.

3.3. Examination of Transfection Efficiency with PX601-GFP Plasmid

The transfection efficiency of the synthesized PβAE-based transfection agent was examined with the PX601-GFP plasmid. The transfected cells are shown in Figure 3. Since the plasmid contains the gene sequence encoding the green fluorescent protein, the cells appear green under a fluorescent microscope after transfection. Figure 3 shows the images of the cells under a fluorescence microscope in Figures A and B. The cells successfully received the PX601-GFP plasmid, and transfection was carried out using the synthesized PNP. Then, using the ImageJ program, the ratios of cells counted with normal light and fluorescence light images in the same area were calculated as percentages relative to each other using the cell counting tab. As a result, the transfection efficiency achieved with the synthesized PNP was calculated as 90-95%.

3.4. Knock-out of the Cox-2 Gene with Cox-2 Double Nickase Plasmid (h)

The synthesized PNP carrier system was used to deliver the Double Nickase plasmid, which facilitated the knock-out of the COX-2 gene. The transfected cells are shown in Figure 4. Since the Plasmid contains the gene sequence encoding the GFP protein to monitor transfection, the cells appear green under a fluorescent microscope after transfection. Figure 4 shows the image of the cells under a light and fluorescence microscope. It is seen that the cells successfully received the plasmid and transfected with the synthesized PNP.

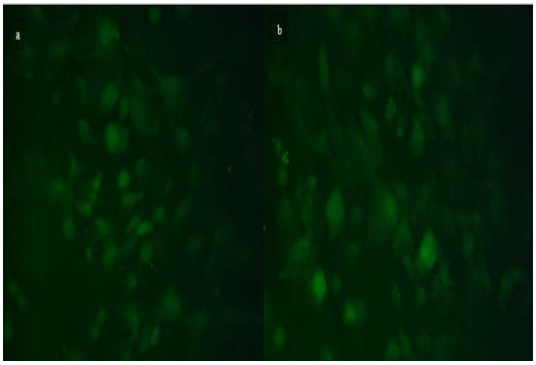


Figure 3. Results of the transfection performed with PX601-GFP Plasmid (a and b). View of transfected cells under a fluorescence microscope

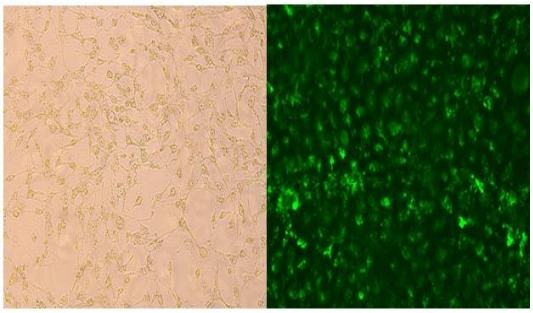


Figure 4. Results of the transfection process into HUVEC cells with *Cox-2 Double Nickase Plasmid (h)*

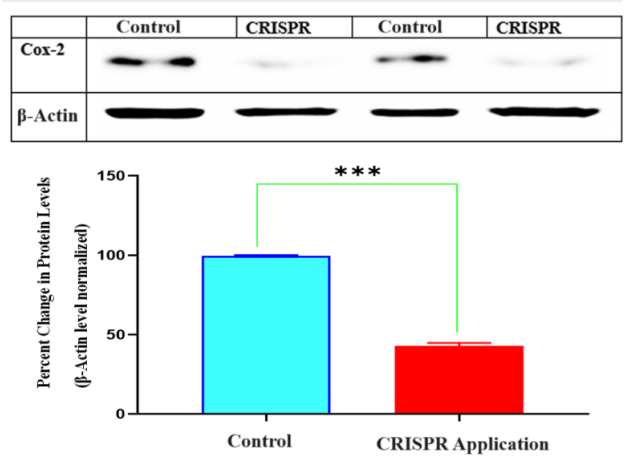


Figure 5. Western blot result (***p < 0.001 versus control group.)

3.5. Western Blot Results

Western blot analysis was performed to analyze CRISPR efficiency. The results were normalized with the β-actin antibody, and the change in protein expression level was analyzed using the image lab 6.1 program. The results are shown in Figure 5. The Western blot results showed that

when the control without CRISPR study was compared with the cells in which the COX-2 gene was silenced, the expression of COX-2 protein was calculated as 57.12% in the HUVEC cell culture in which the gene was silenced.

3.6. Cell Migration Assay in HUVEC Cells

The cell migration rate was determined using the ImageJ program. Migration results are shown in Figure 6. The figure shows that the CRISPR application's migration rate was lower than the control's. This showed that the gene silencing process was successful. The results were consistent with Western blot data.

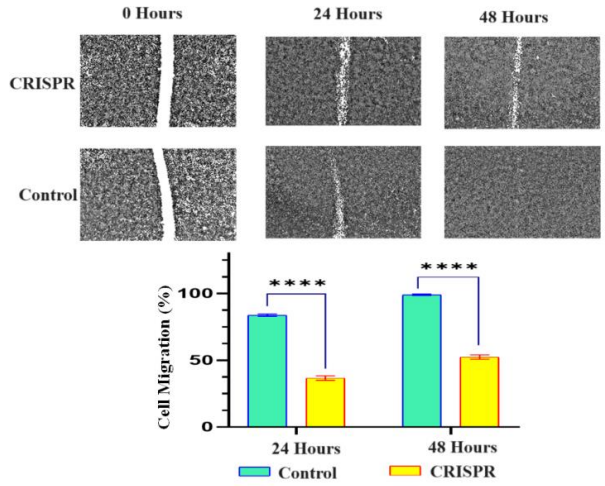


Figure 6. Cell migration result (****p < 0.0001 versus the control group.)

4. Conclusions

This study investigated the CRISPR plasmid transport and CRISPR efficiency of a PβAE-based transfection agent. The results showed that the PβAE-based transfection agent successfully carried the CRISPR plasmid, providing 90-95% transfection efficiency. In addition, CRISPR efficiency was calculated as 57.12% based on the Western blot results. While COX-2 induction may be significant in cell migration and wound healing, inhibition of COX-2 promises new approaches to prevent angiogenesis for cancer cells. Since COX-2 inhibitors and inhibiting the COX-2 gene are responsible for inhibiting cell proliferation in several cancer cell models, silencing COX-2 inhibitors and the COX-2 gene suggests that it will be one of the critical future therapeutic targets.

Future studies should optimize the PβAE-based delivery system to increase transfection and CRISPR efficiency. In addition, the therapeutic potential of this approach can be validated in vivo by evaluating its efficacy in different cancer models and investigating potential off-target effects. COX-2 inhibition is significant, especially in cancer treatment and strategies against inflammatory diseases. Increasing prostaglandin production, COX-2 is critical in essential cell proliferation, angiogenesis, and metastasis processes. Inhibition of COX-2 can prevent cancer progression by inhibiting the growth and metastasis of tumor cells. In addition, angiogenesis can be suppressed by decreasing the production of prostaglandin E2 (PGE2), which can limit the ability of tumors to form new vessels. In conclusion, targeted silencing of COX-2 with gene editing technologies such as CRISPR/Cas9 may pave the way for new and effective strategies in cancer therapies, primarily by reducing side effects. This will pave the way for the translation of findings into clinical applications and advance the field of precision medicine and targeted cancer therapy.

In the literature, many PBAE-based transfection agents have been synthesized, and the particle sizes of these agents have been reported to be generally in the range of 50-200 nm (Lynn and Langer, 2000a; Yin et al. 2011). For example, developed a large PBAE library and emphasized that the sizes of these particles ranged from 50-200 nm and that the polymer structure influenced gene delivery efficiency (Anderson et al. 2005b; Karlsson et al. 2020b). Considering these studies, the particle size of 60 nm obtained in our study is within the limits reported in the literature and may offer various advantages and disadvantages in terms of transfection efficiency.

Declaration of Ethical Standards

This study is derived from the doctorate thesis (thesis number: 672486) under the supervision of Prof. Dr. İsa Gökçe and co-supervisor Assoc. Prof. Dr. Mehmet Koray Gök on the date of May 20, 2021, titled "Investigation of the usability of polymeric nanoparticle-based transfection agent for CRISPR/CAS9-mediated editing of COX-2 gene".

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Investigation, Resources, Writing – original draft,
Author-2: Conceptualization, investigation and writing – review and editing.
Author-3: Conceptualization, investigation, methodology and supervision
Author-4: Conceptualization, investigation, methodology, and supervision and writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

Acknowledgement

This study was supported by Tokat Gaziosmanpaşa University Scientific Research Projects under project number 2020/65. The authors would like to express their gratitude to the Tokat Gaziosmanpaşa University Scientific Research Unit for their valuable support.

5. References

Anderson, D.G., Akinc, A., Hossain, N., Langer, R., 2005a-b. Structure/property studies of polymeric gene delivery using a library of poly(β-amino esters). Molecular Therapy, **11**, 426-434. https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2004.11.015

Anderson, D.G., Green, J.J., Langer, R., 2008. A combinatorial polymer library approach yields insight into nonviral gene delivery. Acc Chem Res, **41**, 749–759 https://doi.org/10.1021/ar7002336

Auerbach, R., Lewis, R., Shinners, B., Kubai, L., Akhtar, N., 2003. Angiogenesis assays: A critical overview. Clin Chem, **49**, 32-40 https://doi.org/10.1373/49.1.32

Baylis, F., McLeod, M., 2017. First-in-human Phase 1 CRISPR Gene Editing Cancer Trials: Are We Ready? Curr Gene Ther, **17**, 309-319. https://doi.org/10.2174/1566523217666171121165935

Gaj, T., Gersbach, C.A., G.A., Barbas, C.F., 2013. ZFN, TALEN, and CRISPR/Cas-based methods for genome engineering: Trends in Biotechnology. Trends Biotechnol, **31**, 397-405. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.04.004.

Gök, M.K., Demir, K., Cevher, E., Pabuccuoğlu, S., Özgümüş, S., 2022. Efficient polycation non-viral gene delivery system with high buffering capacity and low molecular weight for primary cells: Branched poly(β-aminoester) containing primary, secondary and tertiary amine groups. Eur Polym J **166**, 111046 https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111046

Guo, C., Ma, X., Gao, F., Guo, Y., 2023. Off-target effects in CRISPR/Cas9 gene editing Front Bioeng Biotechnol, **9**;11:1143157 https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1143157

Hosur, V., Low, B.E., Wiles, M. V., 2023. Genetic modification of mice using CRISPR-Cas9: Best practices and practical concepts explained, in: Rigor and Reproducibility in Genetics and Genomics, 425-452 https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817218-6.00018-8

Hryhorowicz, M., Lipiński, D., Zeyland, J., 2023. Evolution of CRISPR/Cas Systems for Precise Genome Editing. Int J Mol Sci, **18**;24(18):14233. https://doi.org/10.3390/ijms241814233

İmamoğlu, R., Kaplan, Ö., Gök, M.K., Gökçe, İ., 2022. Polymer-Based Transfection Agents Used in Crispr-Cas9 System. Türk Doğa ve Fen Dergisi, **11**,151-156 https://doi.org/10.46810/tdfd.795053

Kang, Y.K., Kwon, K., Ryu, J.S., Lee, H.N., Park, C., Chung, H.J., 2017. Nonviral Genome Editing Based on a Polymer-Derivatized CRISPR Nanocomplex for Targeting Bacterial Pathogens and Antibiotic Resistance. Bioconjug Chem, **28**, 957-967 https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.6b00676

Kaplan, Ö., Gökşen Tosun, N., Özgür, A., Erden Tayhan, S., Bilgin, S., Türkekul, İ., Gökce, İ., 2021. Microwave-assisted green synthesis of silver nanoparticles using crude extracts of Boletus edulis and Coriolus versicolor: Characterization, anticancer, antimicrobial and wound healing activities. J Drug Deliv Sci Technol **64**, 102641. https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2021.102641

Kaplan, Ö., İmamoğlu, R., Şahingöz, İ., Gökçe, İ., 2021. Recombinant production of Thermus aquaticus single-strand binding protein for usage as PCR enhancer. International Advanced Researches and Engineering Journal **5**, 42–46. https://doi.org/10.35860/IAREJ.766741

Karlsson, J., Rhodes, K.R., Green, J.J., Tzeng, S.Y., 2020a-b. Poly(beta-amino ester)s as gene delivery vehicles: challenges and opportunities. Expert Opin Drug Deliv, 31;17(10):1395–1410. https://doi.org/10.1080/17425247.2020.1796628

Khoshandam, M., Soltaninejad, H., Mousazadeh, M., Hamidieh, A.A., Hosseinkhani, S., 2024. Clinical applications of the CRISPR/Cas9 genome-editing system: Delivery options and challenges in precision medicine. Genes Dis, **11**, 268-282. https://doi.org/10.1016/j.gendis.2023.02.027

Kuduğ, H., Ataman, B., İmamoğlu, R., Düzgün, D., Gökçe, İ., 2019. Production of red fluorescent protein (mCherry) in an inducible E. coli expression system in a bioreactor, purification and characterization. International Advanced Researches and Engineering Journal **3**, 20–25.

Kuhn, J., Lin, Y., Krhac Levacic, A., Al Danaf, N., Peng, L., Höhn, M., Lamb, D.C., Wagner, E., Lächelt, U., 2020. Delivery of Cas9/sgRNA Ribonucleoprotein Complexes via Hydroxystearyl Oligoamino Amides. Bioconjug Chem, **31**, 29–742. https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.9b00853

Liu, B.Y., He, X.Y., Xu, C., Xu, L., Ai, S.L., Cheng, S.X., Zhuo, R.X., 2018. A Dual-Targeting Delivery System for Effective Genome Editing and in Situ Detecting Related Protein Expression in Edited Cells. Biomacromolecules, **19**, 2957-2968. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b00511

Liu, C., Zhang, L., Liu, H., Cheng, K., 2017. Delivery strategies of the CRISPR-Cas9 gene-editing system for

therapeutic applications. Journal of Controlled Release, **28**, 17-26. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.09.012

Liu, D., Ji, L., Wang, Y., Zheng, L., 2013. Cyclooxygenase-2 Expression, Prostacyclin Production and Endothelial Protection of High-density Lipoprotein. Cardiovascular & Hematological Disorders-Drug Targets, **12**, 98-105. https://doi.org/10.2174/1871529x11202020098

Lynn, D.M., Langer, R., 2000a-b. Degradable poly(β-amino esters): Synthesis, characterization, and self-assembly with plasmid DNA. J Am Chem Soc **122**, 0761–10768. https://doi.org/10.1021/ja0015388

Mirón-Barroso, S., Correia, J.S., Frampton, A.E., Lythgoe, M.P., Clark, J., Tookman, L., Ottaviani, S., Castellano, L., Porter, A.E., Georgiou, T.K., Krell, J., 2022. Polymeric Carriers for Delivery of RNA Cancer Therapeutics. Noncoding RNA, **8**, 58. https://doi.org/10.3390/ncrna8040058

Nie, D., Guo, T., Yue, M., Li, W., Zong, X., Zhu, Y., Huang, J., Lin, M., 2022. Research Progress on Nanoparticles-Based CRISPR/Cas9 System for Targeted Therapy of Tumors. Biomolecules, **5**, 1239. https://doi.org/10.3390/biom12091239

Ricciotti, E., Fitzgerald, G.A., 2011. Prostaglandins and inflammation. Arterioscler Thromb Vasc Biol, **31**, 986-1000. https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.110.207449

Rouzer, C.A., Marnett, L.J., 2009. Cyclooxygenases: Structural and functional insights. J Lipid Res, **50**, 29-34 https://doi.org/10.1194/jlr.R800042-JLR200

Songur, M., Bilgin, S., Erden Tayhan, S., Gökçe, İ., 2020. Investigation of Anti-proliferative and Anti-migratory Properties of Recombinant J2-C2 Against Tumor Cells. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi **10**, 2943-2951 https://doi.org/10.21597/jist.730267

Tao, Y., Hou, X., Zuo, F., Li, X., Pang, Y., Jiang, G., 2019. Application of nanoparticle-based siRNA and CRISPR/Cas9 delivery systems in gene-targeted therapy. Nanomedicine, **14**, 511-514. https://doi.org/10.2217/nnm-2018-0522

Wang, Xianqing, Li, Y., A, S., Lyu, J., Wang, Xi, He, Z., Lara-Sáez, I., Li, M., Wang, W., 2024. Cyclization-enhanced poly(β-amino ester)s vectors for efficient CRISPR gene editing therapy. Journal of Controlled Release, **368**, 444-452. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.02.032

Wu, G.F., Luo, J., Rana, J.S., Laham, R., Sellke, F.W., Li, J., 2006. Involvement of COX-2 in VEGF-induced angiogenesis via P38 and JNK pathways in vascular endothelial cells. Cardiovasc Res, **69**, 512–519. https://doi.org/10.1016/j.cardiores.2005.09.019

Yin, Q., Gao, Y., Zhang, Z., Zhang, P., Li, Y., 2011. Bioreducible poly (β-amino esters)/shRNA complex nanoparticles for efficient RNA delivery. Journal of Controlled Release, **151**, 35-44. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2010.12.014

Zhang, F., Wen, Y., Guo, X., 2014. CRISPR/Cas9 for genome editing: Progress, implications and challenges. Hum Mol Genet **23**, 40-46. https://doi.org/10.1093/hmg/ddu125

Zhou, S., Li, Y., Wu, Q., Gong, C., 2024. Nanotechnology-based CRISPR/Cas9 delivery system for genome editing in cancer treatment. MedComm- Biomaterials and Applications, **176**, 113891. https://doi.org/10.1002/mba2.70

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

e-ISSN: 2149-3367
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041201 (720-728)

DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1564932
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041201 (720-728)

Yeni Bisiklik Pirol Türevlerinin Sentezi için Etkili Sentetik Yöntem

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.10.2024
Kabul/Accepted: 24.01.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Efficient Synthetic Methodology for the Synthesis of New Bicyclic Pyrrole Derivatives

Nuriye Tuna SUBAŞI*

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

© 2025 The Author | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bir dizi yeni bisiklik pirol türevleri (pirolizin ve indolizin benzeri yapılar), iki aşamalı bir prosedürle başarıyla sentezlenmiştir. Bu süreç, dimetoksitetrahidrofuran ve amino asit esterleri ile başlayarak, sübstitüe edilmemiş pirol türevlerinin ve uygun kloroenonlarla amino asit esterlerinin reaksiyonları ile 1,2-disübstitüe ve 1,2,4-trisübstitüe pirol türevlerinin rasemizasyon olmaksızın elde edilmesini içermektedir. Ardından, sentezlenen bu sübstitüe ve sübstitüe edilmemiş pirol türevleri BBr_3 (bor tribromür) ile siklizasyon reaksiyonlarına tabi tutularak, yeni bisiklik pirol türevleri yüksek verimle elde edilmiştir. Bu sentez stratejisi, literatürdeki diğer yöntemlerden ayrılarak daha geniş bir substrat aralığı ve daha iyi verim sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Sübstitüe pirol türevi; Kloroenon; BBr_3 siklizasyonu; İndolizin; Pirolizin*

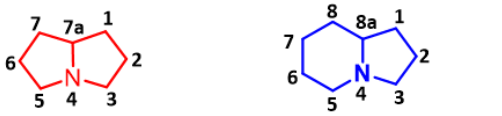
Abstract

A series of novel bicyclic pyrrole derivatives (pyrrolizine and indolizine like structures) were successfully synthesized in a two-step procedure. Starting from dimethoxytetrahydrofuran and amino acid esters, unsubstituted pyrrole derivatives and 1,2-disubstituted and 1,2,4-trisubstituted pyrrole derivatives were synthesized without racemization through the reaction of amino acid esters with suitable chloroenones. Subsequently, these substituted and unsubstituted pyrrole derivatives were subjected to cyclization reactions with BBr_3 (boron tribromide), resulting in the formation of new bicyclic pyrrole derivatives with good yields. This synthesis strategy stands out by providing a broader substrate scope and improved yields compared to existing methods in the literature.

Keywords: *Substituted pyrrole derivative; Chloroenone; BBr_3 cyclisation; Indolizine; Pyrrolizine*

1. Giriş

Pirol ve türevleri, heteroaromatik bileşiklerin bir üyesi olarak birçok doğal ürünün yapısında yer alır ve organik kimyada önemli bir yere sahiptir (Ragno vd., 2000; Liu vd., 2000; Caldarelli vd., 1999). Porfirin, hemin, klorofil gibi biyolojik açıdan kritik doğal ürünlerin yanı sıra alkaloidlerin ana bileşenini oluşturan piroller, tıp ve tarım alanlarında geniş bir uygulama alanına sahiptir (Haubmann vd., 1999; Dieter ve Yu, 2000). Özellikle biyolojik aktif olan 1,2,3,5-tetrasübstitüe pirol türevleri (Tanaka vd., 1980) çeşitli fizyolojik aktivite gösterirler. (Yates, 1984; Jones, 1992; Corvo ve Pereira, 2002; Lehuede, 1999). Bu bileşiklerin antibakteriyel (Daidone, 1980), antiviral (Almerico, 1998), antienflamatuar (Kaiser ve Glenn, 1972) ve antioksidan özelliklerinin yanı sıra sitokin aracılı hastalıkların inhibisyonunda etkili oldukları kanıtlanmıştır Son yıllarda, pirolizidin ve indolizidin alkaloidleri (Şekil 1), hem yapısal konformasyonları hem de güçlü biyolojik aktiviteleri nedeniyle total sentezde önemli bir hedef haline gelmiştir (Michael, 2004). Bu bileşikler, antienflamatuar ve antitümör ajanları gibi farmasötik aktivitelerle ilişkilendirilmiştir (Bashiardes vd., 2004).



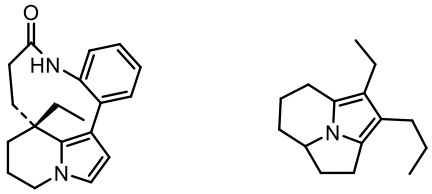
Şekil 1. Pirolizidin ve indolizidin alkaloidlerinin yapısı

Araştırmalar, bu tür alkaloidlerin biyolojik aktivitelerinin mekanizmalarını anlamak ve bunları farmasötik olarak kullanıma uygun hale getirmek amacıyla yoğunlaşmıştır. Aynı zamanda, sentez yöntemlerinin geliştirilmesi ve mevcut tekniklerin daha geniş bir substrat aralığını kapsayacak şekilde optimize edilmesi de önemli bir hedef olmuştur. Bu bağlamda, yeni pirol türevlerinin sentezi ve biyolojik aktivitelerinin incelenmesi, organik kimya ve ilaç geliştirme alanlarında dikkat çeken bir konu olmaya devam etmektedir.

Özellikle izole pirol halkası içeren alkaloidler; bitkiler, omurgasızlar, mantarlar ve bakteriler gibi çeşitli kaynaklarda ikincil metabolitler olarak tanımlanmıştır (Gossauer, 2003). Pek çok doğal ürün, pirol halkası içeren bisiklik veya polisiklik sistemlerden oluşur. Son zamanlarda antikanser alkaloid (-)-rhazinilam (1) ve

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Nuriye Tuna Subaşı e-posta /e-mail: tunasubasi@gmail.com

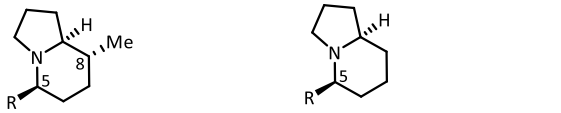
alkaloid myrmicarin (2) gibi pirol halkasının etkilenmediği doğal olarak oluşan 5,6,7,8-tetrahidroindolizidinler bulunmuştur.



Şekil 2. Antikanser alkaloid (-)-rhazinilam ve myrmicarin'in yapısı

Pirolizidin alkaloidleri geniş bir biyolojik aktivite yelpazesine sahiptir. Örneğin, polihidroksile pirolizidin alkaloidleri şeker taklitleridir ve potansiyel glikozidaz inhibitörleri olarak kabul edilirler, bu da onları kanser, diyabet ve viral enfeksiyonlar gibi hastalıkların tedavisi için umut verici ilaç adayları haline getirir (Harit ve Ramesh, 2016; Chen vd., 2018; Massicot vd., 2019; Tamariz vd., 2018). Bununla birlikte, bazı pirolizidinler kanserojen, hepatotoksik ve mutajenik etkiler göstermektedir. Bu oldukça toksik alkaloidler ve onların sentetik analogları, tarımda doğal pestisit olarak kullanılmaktadır (Hartmann ve Witte, 1995; Rizk, 1990; Mattocks, 1986; Wiedenfeld vd., 2008; Fu vd., 2004).

Son yıllarda, biyolojik özellikleri nedeniyle 5-sübstitüe indolizidinlere büyük ilgi duyulmaktadır. Trans 8-metil sübstitüenti içeren alkaloidler (3), dendrobatid kurbağalardan izole edilmiş olup nikotinik reseptör kanallarının en güçlü rekabetçi olmayan inhibitörleri olduğu bulunmuştur (Daly vd., 1991). Buna ek olarak, çeşitli mantarlara ve gram-pozitif bakterilere (Raub ve Cardellina, 1992) karşı antimikrobiyal özellikler gösteren 5-sübstitüe alkaloidler (4) de kurbağalardan izole edilmiştir (Daly, 1982; Daly vd., 1987; Tokuyama vd., 1987; Tokuyama vd., 1991). Bu bulgular, pirol ve indolizidin türevlerinin ilaç keşfi ve geliştirme süreçlerinde potansiyel olarak önemli rol oynayabileceğini göstermektedir.



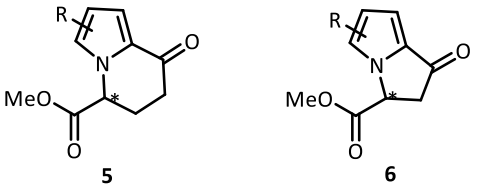
R=pentil, pentenil, pentinil — **3**

R=propil, dekenil, dekadienil, dekatrienil — **4**

Şekil 3. 5-sübstitüe indolizidinlerin yapısı

Literatürde doğal olarak oluşan 5-sübstitüe ve 5,8-disübstitüe indolizidinlerin sentezi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir; ancak bu yaklaşımlar genellikle bazı sınırlamalar içermektedir. Başlıca zorluklar arasında şunlar yer alır: (1) R yan zincirlerinin sentez sürecine erken dahil edilmesi analogların üretiminde zorluk yaratmakta; (2) düşük verimlilik nedeniyle birçok sentetik yolun uzun ve pratik olmayan bir süreç içermesi (Bond vd., 1993).

Bu nedenle, indolizidin alkaloidleri için yeni bir sentetik yol geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu bileşiklerin basit yapısı, sentetik yöntemlerin geliştirilmesi için uygun bir model oluşturmaktadır. Pirol türevlerinin kimyasal ve biyolojik açıdan önemi göz önüne alındığında, bu çalışmanın temel hedefi, kiral sübstitüe ve sübstitüe olmayan yeni pirol türevlerini tasarlamak ve bu türevlerin BBr_3 ile reaksiyonlarını gerçekleştirerek indolizidin benzeri **(5)** ve pirolizidin benzeri **(6)** yeni bisiklik pirol yapılarının sentezini sağlamaktır. Bu çalışmada, indolizidin ve pirolizidin benzeri yeni bisiklik pirol yapıların daha etkin ve verimli bir şekilde sentezine odaklanılmıştır.



Şekil 4. Yeni bisikilik pirol yapıları

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında kullanılan tüm reaktifler ve çözücüler kimyasal tedarikçilerden temin edildi. Çözücüler, reaktif sınıfında oldukları için ek saflaştırma işlemi yapılmadan kullanıldı. IR spektrumları, Thermo Scientific Smart iTR cihazı kullanılarak elde edildi; NMR spektrumları ise Bruker DPX 400 cihazında kaydedildi. Kimyasal kaymalar (δ) ppm cinsinden rapor edildi. İç standartlar olarak $CHCl_3$ (^{1}H: δ = 7.27), $CDCl_3$ (^{13}C: δ = 77.0) ve CCl_4 (^{13}C: δ = 96.4) referans alındı.

Organik moleküllerin saflaştırılması, flash kolon kromatografisi yöntemiyle gerçekleştirildi. Bu işlem sırasında 40-63 µm gözenek boyutuna sahip silika jel (Merck, Kieselgel 60 Å) kullanıldı. Reaksiyonların ilerleyişi, ince tabaka kromatografisi (İTK) yöntemiyle takip edildi. İTK analizleri, reaksiyon ortamından alınan örneklerin silika jel 60F254 (Merck) ile kaplanmış alüminyum plakalar üzerine uygulanmasıyla gerçekleştirildi; spotlar 254 nm dalga boyunda UV ışığı altında gözlemlendi. 'Buharlaştırma' terimi, düşük basınç altında gerçekleştirilen çözücü uzaklaştırma işlemini ifade etmektedir.

2.1 Sübstitüe Olmayan Pirol Türevlerinin Sentezi için Genel Sentez Yöntemi

Sübstitüe olmayan pirol türevleri (5a ve 6a), daha önceki çalışmamızda belirtilen yöntem takip edilerek sentezlenmiştir (Demir, 2006). Amino asit esteri (10 mmol) 5 mL su içinde çözüldü. Bu çözeltiye, oda

sıcaklığında 2,5-dimetoksitetrahidrofuran (12 mmol), glasiyal asetik asit (4 mL) ve dikloroetan (30 mL) ilave edildi. Karışım, geri soğutucu altında 3 saat süreyle kaynatıldı. Reaksiyon, etil asetat-hekzan (1:3) çözücü sistemi kullanılarak ince tabaka kromatografisi (İTK) ile takip edildi. Reaksiyon tamamlandıktan sonra, iki faz ayrıldı ve sulu faz üç kez $CHCl_3$ (kloroform) ile ekstrakte edildi. Birleştirilen organik fazlar, $MgSO_4$ (magnezyum sülfat) üzerinde kurutularak, çözücü indirgenmiş basınç altında uzaklaştırıldı. Ham ürün, etilasetat/hekzan (1:3) karışımı kullanılarak flaş kolon kromatografisi yöntemiyle saflaştırıldı.

2.2 Kloroenonların hazırlanması

Kloroenonlar, literatürde belirtilen yöntem takip edilerek hazırlandı (Barbry vd., 1993). Alüminyum klorür (55 mmol) oda sıcaklığında 110 mL diklorometan içinde çözüldü. Çözünmeyen alüminyum tuzu uzaklaştırılmak için çözelti hızlıca süzüldü. Daha sonra bu çözeltiye damla damla asit klorür (50 mmol) ilave edildi. Elde edilen homojen karışım, 0°C'ye soğutuldu ve sıcaklık korunarak, 20 dakika boyunca 20 mL diklorometan içinde çözünmüş doymamış bir bileşik (50 mmol) ilave edildi. Karışım, 0°C'de 30 dakika süreyle karıştırıldı ve ardından 10 g buz ve 10 g su karışımına döküldü. Oluşan çökelti, HCl (hidroklorik asit) kullanılarak çözüldü ve sulu faz, diklorometan ile ekstrakte edildi. Fazlar ayrıldıktan sonra, organik faz doymuş sodyum bikarbonat çözeltisi ile yıkandı. Karışım, renk yeşilden sarıya dönene kadar çalkalandı, ardından süzüldü, magnezyum sülfat üzerinde kurutuldu ve indirgenmiş basınç altında konsantre edildi. Elde edilen ham ürün, herhangi bir ek saflaştırma yapılmadan sonraki aşamalarda kullanıldı.

2.3. 1,2-Disübstitüe ve 1,2,4-trisübstitüe Pirol Türevlerinin Sentezi için Genel Sentez Yöntemi

Sentez işlemi, amino asit hidroklorür (10 mmol) çözeltisinin 5 mL su içerisinde çözülmesiyle başlatıldı. Elde edilen çözeltiye sırasıyla 10 mmol kloroenon, 20 mmol trietilamin ve 15 mL benzen eklendi. Reaksiyon karışımı, geri soğutucu eşliğinde 3 saat süreyle kaynatıldı ve reaksiyonun ilerleyişi, etil asetat-hekzan (1:3 ve 1:5) çözücü sistemi kullanılarak ince tabaka kromatografisi (İTK) ile takip edildi. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve organik faz sulu fazdan ayrıldı. Sulu faz, 15 mL diklorometan ile iki kez ekstrakte edildi. Elde edilen organik fazlar birleştirildi, su ile yıkandı ve magnezyum sülfat ($MgSO_4$) üzerinde kurutuldu. Daha sonra organik faz, düşük basınç altında konsantre edildi. Elde edilen ham ürün, etil asetat/hekzan (1:7) karışımı kullanılarak kolon kromatografisi yöntemiyle saflaştırıldı.

2.4 İndolizin Yapılarının (5,6) ve Pirolizin Yapılarının (5,5) Sentezi için Genel Sentez Yöntemi

Pirol türevlerinin (10 mmol) kuru diklorometan (CH_2Cl_2, 30 mL) içinde hazırlanmış çözeltisi, buz-su banyosu kullanılarak 5°C'ye kadar soğutuldu. Bu çözeltiye, CH_2Cl_2 (diklorometan) içerisinde hazırlanmış bor tribromür (BBr_3, 3 mL) çözeltisi, damla damla ve kontrollü bir şekilde ilave edildi. Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra karışım, oda sıcaklığında 30 dakika boyunca karıştırılmaya devam edildi. Ardından, reaksiyon soğutma eşliğinde birkaç dakika kuvvetlice karıştırılarak doymuş sulu sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) çözeltisi (10 mL) eklenerek sonlandırıldı. Elde edilen sulu faz, CH_2Cl_2 (diklorometan) ile ekstrakte edildi ve organik faz, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) üzerinde kurutularak düşük basınç altında konsantre edildi. Elde edilen ham ürün, etil asetat/hekzan (1:3) karışımı kullanılarak kolon kromatografisi yöntemiyle saflaştırıldı.

2.4.1 Metil-7-okso-4,5,6,7-tetrahidro-3aH-indene-4-karboksilat (5a)

Renksiz yağımsı ürün %80 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 6.93 (dd, *J* = 4,04, 1,50 Hz, 1H), 6,80 (dd, *J* = 2,45, 1,59 Hz, 1H), 6,21 (dd, *J* = 4,03, 2,56 Hz, 1H), 4,88 (dd, *J* = 4,44, 3,03 Hz, 1H), 3,68 (s, 3H), 2,53-2,39 (m, 4H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 185,7, 169,9, 130,4, 126,5, 114,5, 110,9, 56,4, 52,8, 33,1, 26,2. HRMS (ESI) $C_{10}H_{11}NO_3$ için hesaplanan, $[M + H]^+$: 193,0739, bulunan 193,0800.

2.4.2 Metil-1,3-dimetil-7-okso-4,5,6,7-tetrahidro-3aH-indene-4-karboksilat (5b)

Açık sarı yağımsı ürün %70 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 5,82 (s, 1H), 4,69 (s, 1H), 3,73 (s, 3H), 2,66-2,43 (m, 4H), 2,31 (s, 3H), 2,10 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl^3$) δ (ppm): 183,3, 168,1, 131,6, 128,2, 124,3, 110,5, 51,7, 50,8, 31,1, 24,2, 11,4, 9,9. HRMS (ESI) $C_{12}H_{15}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 221,1052, bulunan 221,1099.

2.4.3 Metil-3-metil-7-okso-4,5,6,7-tetrahidro-3aH-inden-4-karboksilat (5c)

Açık sarı yağımsı ürün %77 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 7,02 (d, *J* = 3,98 Hz, 1H), 6,08 (d, *J* = 3,78 Hz, 1H), 4,93-4,82 (m, 1H), 3,78 (s, 3H), 2,78-2,38 (m, 4H), 2.2, (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 184,5, 171,7, 135,3, 126,8, 118,9, 108,0, 60,4, 52,2, 33,5, 26,2, 12,8. HRMS (ESI) $C_{11}H_{13}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 207,0895, bulunan 207,0963.

2.4.4 Metil-3-izopropil-7-okso-4,5,6,7-tetrahidro-3aH-inden-4-karboksilat (5d)

Sarı yağımsı ürün %72 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 7,09 (d, *J* = 4,04 Hz, 1H), 6,15 (d, *J* =

4,12 Hz, 1H), 5,12-4,86 (m, 1H), 3,77 (s, 3H), 2,86-2,60 (m, 4H), 2,60-2,38 (m, 1H), 1,23 (t, *J* = 6,52 Hz, 6H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 170,2, 154,7, 154,4, 112,8, 107,3, 53,6, 53,0, 52,1, 51,5, 32,6, 26,5, 25,8, 23,4, 22,2. HRMS (ESI) $C_{13}H_{17}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 235,1208, bulunan 235,1292.

2.4.5 Metil-8-okso-3-fenil-5,6,7,8-tetrahidroindolizin-5-karboksilat (5e)

Turuncu yağımsı ürün %70 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 7,53-7,25 (m, 5H), 6,91 (d, *J* = 4,09 Hz, 1H), 6,44 (d, *J* = 4,11 Hz, 1H), 4,63 (dd, *J* = 8,94, 3,46 Hz, 1H), 3,66 (s, 3H), 2,43-2,11 (m, 4H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 185,4, 171,8, 149,5, 132,8, 129,5, 128,6, 127,7, 126,7, 119,9, 113,2, 60,3, 51,8, 33,8, 26,1. HRMS (ESI) $C_{16}H_{15}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 269,1052, bulunan 269,1106.

2.4.6 Metil-3-okso-1,2,3,6a-tetrahidropentalen-1-karboksilat (6a)

Renksiz yağımsı ürün %85 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 7,10 (d, *J* = 1,53 Hz, 1H), 6,69 (dd, *J* = 3,98, 0,88 Hz, 1H), 6,49 (dd, *J* = 3,95, 2,39 Hz, 1H), 5,05 (dd, *J* = 8,40, 4,10 Hz, 1H), 3,78 (s, 3H), 3,24, (ddd, J_1 = 22,28, J_2 = 18,18, J_3 = 6,26 Hz, 2H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 186,2, 169,2, 132,3, 123,8, 117,4, 108,3, 55,3, 53,1, 43,1. HRMS (ESI) $C_9H_9NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 179,0582, bulunan 179,0515.

2.4.7 Metil-4,6-dimetil-3-okso-1,2,3,6a-tetrahidropentalen-1-karboksilat (6b)

Açık sarı yağımsı ürün %70 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 6,38 (s, 1H), 4,05 (q, *J* = 7.12 Hz, 1H), 3,56 (s, 3H), 3,15 (ddd, *J* = 21,25, J_2= 18,00, J_3 = 6,06 Hz, 2H), 2,21 (s, 3H), 2,09 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 187,7, 170,1, 142,1, 133,6, 132,5, 117,1, 66,1, 54,6, 43,7, 13,5, 12,7. HRMS (ESI) $C_{11}H_{13}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 207,0895, bulunan 207,0824.

2.4.8 Metil-6-metil-3-okso-1,2,3,6a-tetrahidropentalen-1-karboksilat (6c)

Açık sarı yağımsı ürün %71 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 6,64 (d, *J* = 3,91 Hz, 1H), 6,21 (d, *J* = 3,77 Hz, 1H), 4,94 (dd, J_1 = 8,85, J_2 = 3,24 Hz, 1H), 3,75 (s, 3H), 3,15 (ddd, *J* = 21,25, J_2= 18,00, J_3 = 6,06 Hz, 2H), 2,18 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 186,2, 169,7, 134,8, 131,3, 116,5, 109,1, 53,9, 52,9, 44,1, 11,7. HRMS (ESI) $C_{10}H_{11}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 193,0739, bulunan 193,0684.

2.4.9 Metil-6-izopropil-3-okso-1,2,3,6a-tetrahidropentalen-1-karboksilat (6d)

Sarı yağımsı ürün %69 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 7,06 (d, *J* = 4,12 Hz, 1H), 6,13 (d, *J* = 4,13 Hz, 1H), 5,08-4,87 (m, 1H), 3,77 (s, 3H), 2,94-2,59 (m, 2H), 2,59-2,43 (m, 1H), 1,25 (t, *J* = 6,46 Hz, 6H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 186,2, 169,7, 134,8, 131,3, 116,5, 109,1, 53,9, 52,9, 44,1, 11,7. HRMS (ESI) $C_{12}H_{15}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 221,1052, bulunan 221,1122.

2.4.10 Metil-3-okso-6-fenil-1,2,3,6a-tetrahidropentalen-1-karboksilat (6e)

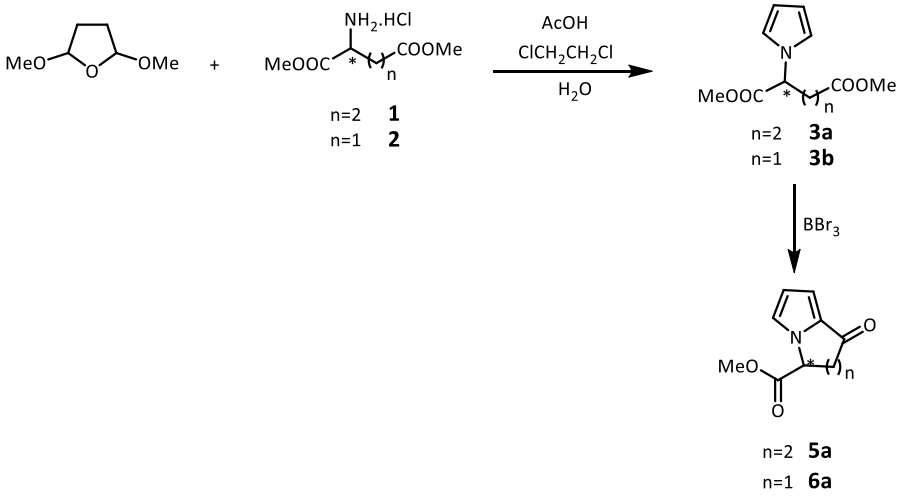
Turuncu yağımsı ürün %69 verimle elde edildi. ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 7,46-7,15 (m, 5H), 6,81 (d, *J* = 4,05 Hz, 1H), 6,63 (d, *J* = 4,06 Hz, 1H), 5,34 (dd, *J* = 8,75, 3,24 Hz, 1H), 3,64 (s, 3H), 2,99 (dtd, *J* = 24,63, 17,33, 4,33 Hz, 2H). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm): 185,7, 169,5, 137,7, 133,3, 130,9, 130,1, 128,9, 128,6, 128,3, 126,8, 116,7, 109,4, 55,4, 52,7, 43,8. HRMS (ESI) $C_{15}H_{13}NO_3$ için hesaplanan $[M + H]^+$: 255,0895, bulunan 255,0945.

3. Bulgular

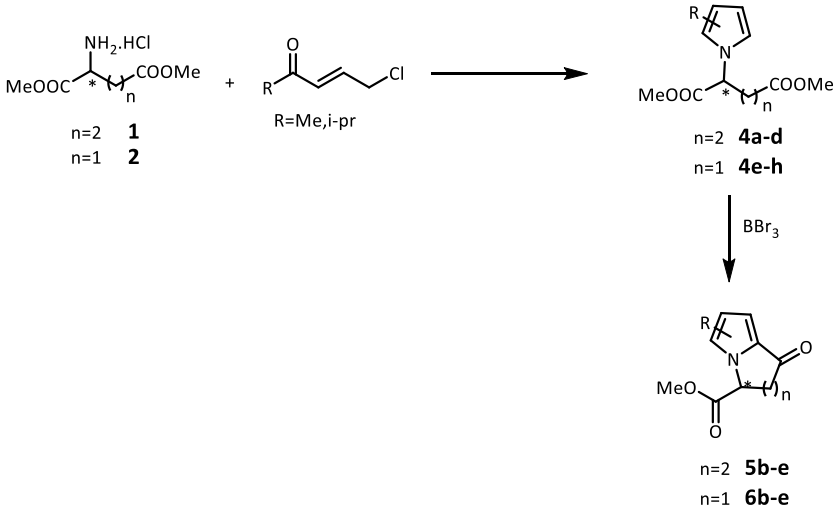
Çalışmanın ilk aşamasında, amino asit esterleri dimetoksitetrahidrofuran ile reaksiyona sokularak, literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntemle (Chadwick ve Hodgson, 1983) bilinen sübstitüe olmayan pirol türevleri (3a ve 3b) sentezlendi (Jefford vd., 1996). Sübstitüe pirol türevleri ise amino asit esterlerinin kloroenonlarla reaksiyonu sonucu elde edildi. Elde edilen bu sübstitüe pirol türevlerinden beş tanesi yeni olup üç tanesi (4e, 4f ve 4g) literatürde mevcuttur (Demir vd., 2001). Bu süreçte, L-glutamik asit metil ester hidroklorür, L-aspartik asit metil ester hidroklorür ve çeşitli kloroenonlar kullanıldı. Elde edilen tüm pirol türevleri kiral yapıdadır; çünkü sentez işlemi, kiral başlangıç maddeleri olan (L)-glutamik asit metil ester hidroklorür ve (L)-aspartik asit metil ester hidroklorür üzerinden gerçekleştirildi. Optik rotasyon ölçümleri, pirol halkasının oluşumu sırasında rasemizasyon meydana gelmediğini doğrulamaktadır.

Elde edilen sübstitüe ve sübstitüe olmayan pirol türevleri, BBr_3 (bor tribromür) ile muamele edilerek %75-85 verimle bisiklik pirol türevlerine dönüştürüldü. Elde edilen bisiklik pirol türevlerinden iki tanesi (5a ve 6a) literatürde mevcut olup (Bond vd., 1993; Jefford vd., 1994) sekiz tanesi yenidir. Sentetik stratejimiz Şekil 5 ve 6'da detaylı olarak sunulmaktadır. Siklizasyon aşaması için alternatif bir yöntem de test edildi. Bu yöntemde, pirol türevlerinin susuz metanoldeki çözeltisinden 3 saat boyunca kuru HCl (hidroklorik asit) gazı geçirildi. Ancak reaksiyonun tamamlanmasının ve saflaştırma işleminin ardından, bisiklik pirol bileşiği %50 verimle elde edildi ki bu, BBr_3 (bor tribromür) yöntemiyle kıyaslandığında düşük bir verimdir. Dolayısıyla, siklizasyon aşamasında BBr_3 (bor tribromür) yöntemi tercih edildi. Reaksiyon sırasında, ester-C pozisyonundaki kiralite korunmaktadır. Karakterizasyon sonuçlarına göre, ^{1}H-NMR spektrumunda

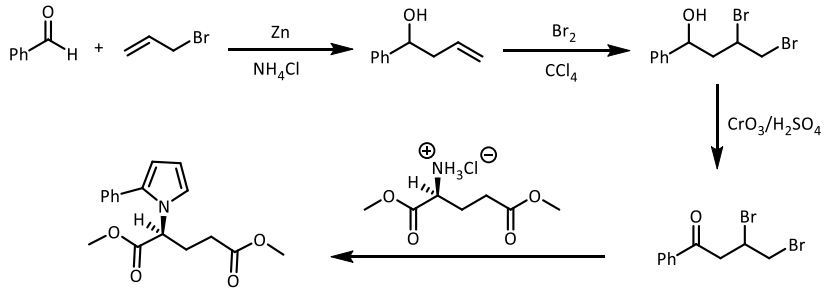
pirol halkasına ait 6.21-6.90 ppm aralığında, amino asidin kiral merkezini işaret eden 4.88-4.93 ppm aralığında ve OCH_3 (metoksi) grubuna karşılık gelen 3.50-3.65 ppm aralığında sinyaller gözlemlendi. IR spektrumunda, keton ve ester gruplarına ait karbonil absorpsiyonları sırasıyla 1730 cm^{-1} ve 1755 cm^{-1} dalga boylarında tespit edildi. ^{13}C-NMR spektrumunda, her iki gruba ait C=O (karbonil grubu) sinyalleri pirol türevlerinde net bir şekilde görüldü, ancak siklizasyon ürünü spektrumunda bir ester grubuna ait sinyal kayboldu.Bisiklik 5,5 ve 5,6 sistemlerinin kiralitesi, başlangıç maddesi olarak kullanılan amino asitlerin kiral yapısından kaynaklanmaktadır. R grubu farklı pozisyonlarda yer alabilmekte, bu da yöntemin çok yönlülüğünü açıkça göstermektedir. Temsili örnekler Çizelge 1'de verilmektedir. 2-Fenil sübstitüe pirol türevinin sentezi sırasında önemli bir sorunla karşılaşıldı. Fenil sübstitüe kloroenon, sentez sürecinde kullanılamadı; çünkü $AlCl_3$ (alüminyum klorür) varlığında allil klorür ile benzoil klorürün reaksiyonu sonucunda hedeflenen kloroenon, oldukça düşük bir verimle (%4-6, ^1H-NMR) elde edildi. Bu durum, 2-fenil pirol türevinin sentezi için alternatif bir yöntemin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu amaçla, dibromo bir bileşik kullanılarak yeni bir sentetik yol geliştirildi. Şekil 7'de gösterildiği üzere, benzaldehit, literatürde tanımlanan bir yöntemle (Demir vd., 2001) allil bromür ile reaksiyona sokuldu ve %75 verimle alkol sentezlendi.



Şekil 5. Sübstitüe olmayan bisiklik pirol türevlerinin genel reaksiyon şeması

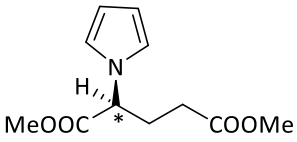
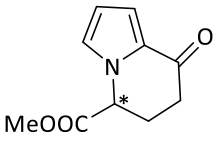
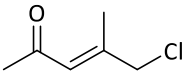
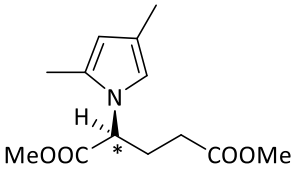
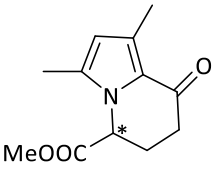
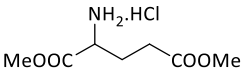
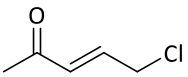
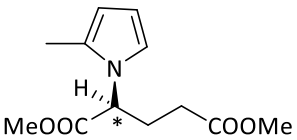
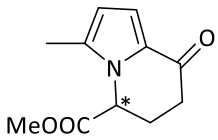
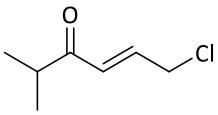
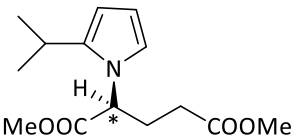
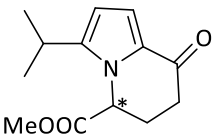
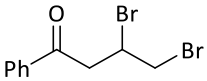
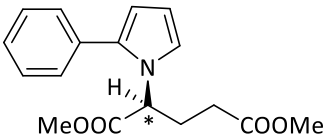
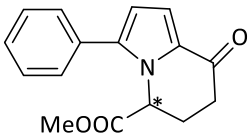
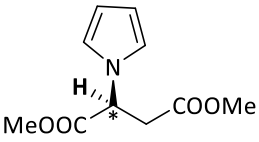
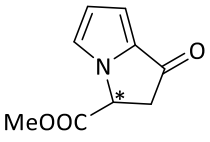
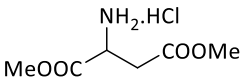
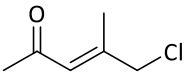
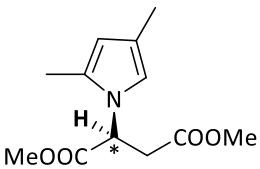
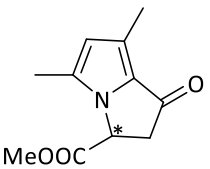
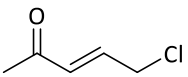
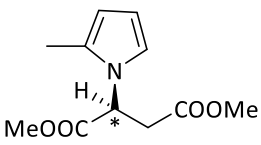
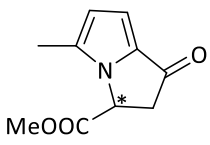


Şekil 6. Sübstitüe bisiklik pirol türevlerinin genel reaksiyon şeması

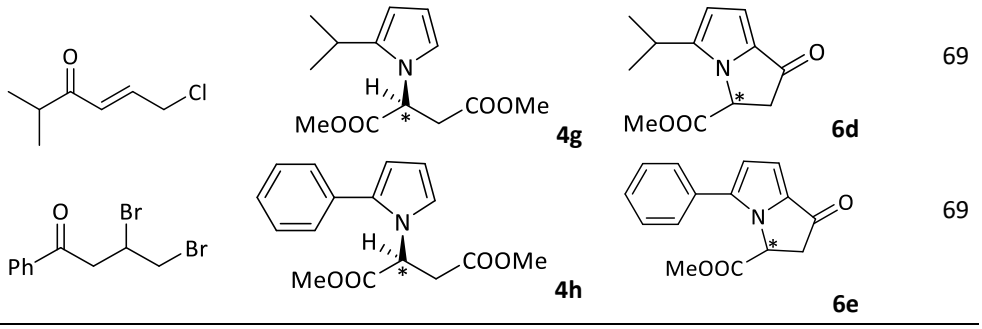


Şekil 7. (L)-glutamik asit metil esterden fenil-sübstitüe pirol türevinin hazırlanması

Çizelge 1. Sentezlenen bisiklik pirol türevleri

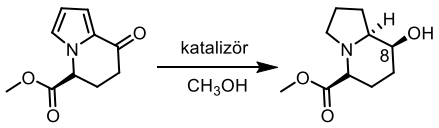
Amino asit esterleri	Kloroenonlar	Piroller	Bisiklik pirol türevleri	Verim %
	-	 **3a**	 **5a**	80
		 **4a**	 **5b**	70
 **1**		 **4b**	 **5c**	77
		 **4c**	 **5d**	72
		 **4d**	 **5e**	70
	-	 **3b**	 **6a**	85
 **2**		 **4e**	 **6b**	70
		 **4f**	 **6c**	71

Çizelge 1. (devam) Sentezlenen bisiklik pirol türevleri



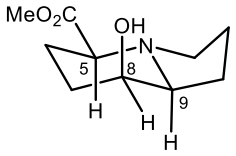
Alkolün bromlanması sonrasında elde edilen dibromo alkol, CrO_3 (krom trioksit) kullanılarak oksitlendi ve hedeflenen dibromo bileşiği %80 verimle sentezlendi. Daha sonra, bu dibromo bileşiği, benzen ve su karışımı içinde trietilamin varlığında (L)-glutamik asit metil ester hidroklorür ile birlikte 6 saat boyunca geri soğutucu altında kaynatıldı ve böylece 2-fenil sübstitüe pirol türevi elde edildi. Benzer bir reaksiyon, (L)-aspartik asit metil ester hidroklorür kullanılarak gerçekleştirildi ve 2-fenil sübstitüe pirol türevi başarıyla sentezlendi.

Sentezlenen (5,6) ve (5,5) bisiklik ürünlerin indolizidin türevlerine dönüştürülüp dönüştürülemeyeceğini değerlendirmek amacıyla seçici bir hidrojenasyon deneyi gerçekleştirildi. Bu amaçla, (5,6) bisiklik sistemi, bir Paar shaker hidrojenatörü kullanılarak hidrojenasyon işlemine tabi tutuldu. Deneyde, literatürde tanımlanmış üç farklı yöntem test edildi: Pd/C (palladyum/karbon) ile asetik asit, H_2SO_4 (sülfürik asit) ile metanol ve Rh/Al_2O_3 (rodyum/alüminyum oksit) katalizörlerinin kullanımı (Şekil 8).



Şekil 8. Bisiklik sistemin hidrojenasyonu

Yapılan deneyler sonucunda, Pd/C (palladyum/karbon), asetik asit ve Rh/Al_2O_3 (rodyum/alüminyum oksit) katalizörlerinin kullanıldığı hidrojenasyon işlemleri başarılı oldu ve hidrojenlenmiş (5,6) indolizidin türevi elde edildi. Literatürdeki verilere göre **5a** bileşiğinin (Bond vd., 1993), C-8 pozisyonundaki stereokimyanın kullanılan katalizöre bağlı olarak değişiklik gösterdiği bildirilmektedir. Rodyum katalizörü, Şekil 9'da gösterildiği üzere, siklik bileşiğin (S)-alkol türevini üretirken, paladyum katalizörü indolizidinin tam indirgenmesine yol açmaktadır. Elde edilen ürünün IR ve ^{1}H-NMR spektrumları, C-5, C-8 ve C-9 pozisyonları arasındaki relatif stereokimyanın literatürdeki beklentilerle uyumlu olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 9. Metil 8-hidroksioktahidroindolizin-5-karboksilat

IR spektrumunda, 2810 cm^{-1}'de gözlemlenen Bohlmann bantlarının varlığı, azot atomunun ortaklanmamış elektronları ile 9-H'nin aksiyal bir pozisyonda yer aldığı trans-halkalı bir bağlantıya işaret etmektedir. Bunun yanı sıra, ^{1}H-NMR spektrumunda, 8-H protonunun trans-bağlanmalar göstermemesi ve çözülmemiş çoklu piklerin dar çizgi genişliği (yaklaşık 8 Hz) ile belirginleşmesi, bu protonun ekvatoryal bir pozisyonda bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Bond vd., 1993).

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, doğal olarak oluşan 5-sübstitüe ve 5,8-disübstitüe indolizidin türevlerinin fonksiyonelleştirilmesine olanak tanıyan yeni bisiklik kiral pirol türevlerinin asimetrik sentezi başarıyla gerçekleştirildi. Sunulan yöntem, birçok açıdan önemli avantajlar sunmaktadır:

1. Başlangıç malzemeleri olan L-glutamik asit metil ester ve L-aspartik asit metil ester kolayca temin edilebilmekte ve ekonomik açıdan uygun maliyetlidir.
2. Elde edilen bisiklik bileşiklerdeki R grubu (COOMe) kolaylıkla modifiye edilebilir, bu da türev üretiminde esneklik sağlamaktadır.
3. Seçici hidrojenasyon reaksiyonlarının kullanımıyla 5-sübstitüe veya 5,8-disübstitüe indolizin alkaloidleri etkin bir şekilde üretilebilmektedir.

Buna ek olarak, bileşiklerin 8. pozisyonunda yer alan sübstitüent (örneğin, OH grubu), nükleofillerle reaksiyona girerek çeşitli analog bileşiklerin sentezlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikler, yöntemin hem kimyasal çeşitlilik açısından hem de endüstriyel uygulamalarda potansiyel taşıyan bir sentetik strateji olduğunu göstermektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Prof.Dr. Ayhan S. DEMİR danışmanlığında Nuriye Tuna SUBAŞI tarafından 2011 tarihinde tamamlanan "Novel synthetic methodologies for heterocycles as building blocks in drug synthesis" başlıklı doktora (Tez no: 286194) tezinden türetilmiştir.

Yazar tüm etik standartlara uyduğunu beyan eder.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar: Konsept, Araştırma, Çalışma Tasarımı, Deneysel Analiz ve Karakterizasyon, Yazım-orijinal taslak.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Prof. Dr. Ayhan S. Demir'in (Orta Doğu Teknik Üniversitesi) finansal desteğine minnetle teşekkür ederim. Bu makale Prof. Dr. Ayhan S. DEMİR'in (1950-2012) anısına ithaf edilmiştir. Dedicated to the memory of Prof. Dr. Ayhan S. DEMIR (1950-2012).

5. Kaynaklar

Almerico, A.M., Diana, P., Barraja, P., Dattolo, G., Mingoia, F., Loi, A.D., Scintu, F., Millia, C., Puddu, I. and La Colla, P., 1998. Glycosidopyrroles Part 1. Acyclic derivatives: 1-(2-hydroxyethoxy) methylpyrroles as potential anti-viral agents. *Farmaco*, **53**, 33-40. https://doi.org/10.1016/S0014-827X(97)00002-5

Barbry, D., Faven, C. and Ajana, A., 1993. Acylation of Unsaturated Halides, Alcohols, Esters and Ketones. *Synth. Commun*., **23**(19), 2647-2658. https://doi.org/10.1080/00397919308013794

Bond, T.J., Jenkins, R., Ridley, A.C. and Taylor, P.C. 1993. Efficient asymmetric synthesis of indolizidine building blocks. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*, 2241-2242. https://doi.org/10.1039/P19930002241

Caldarelli, M., Habermann, J. and Ley, S.V., 1999. Clean five-step synthesis of an array of 1,2,3,4-tetra-substituted pyrroles using polymer-supported reagents. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*, 107-110. https://doi.org/10.1039/A809345H

Chadwick, D.J. and Hodgson, S.T., 1983. The protecting–directing role of the trityl group in syntheses of pyrrole derivatives: efficient preparations of 1-*H*-pyrrole-3-carboxylic acid and 3-acyl-, 3-amino-, and 3-bromo-1-tritylpyrroles. *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 1*, 93-102. https://doi.org/10.1039/P19830000093

Chen, L., Huang, S., Li, C.Y., Gao, F. and Zhou, X.L., 2018. Pyrrolizidine alkaloids from *Liparis nervosa* with antitumor activity by modulation of autophagy and apoptosis. *Phytochemistry*, 147-155. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.06.001

Corvo, M.C. and Pereira, M.A., 2002. A radical approach towards indolizidine 167B. *Tetrahedron Lett*., **43**, 455-458. https://doi.org/10.1016/S0040-4039(01)02189-X

Daidone, G., Maggio, B. and Schillari, D., 1990. Salicylanilide and its heterocyclic analogs: comparative study of their antimicrobial activity. *Pharmazie*., **45**, 441-442.

Daly, J.W., 1982. Alkaloids of Neotropical Poison Frogs (Dendrobatidae). Fortschr. *Chem. Naturst*., **41**, 205. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8656-5_6

Daly, J.W., Myers, C.W. and Whittaker, N., 1987. Further classification of skin alkaloids from neotropical poison frogs (dendrobatidae), with a general survey of toxic/noxious substances in the amphibia. *Toxicon*, **25**, 1023-1095. https://doi.org/10.1016/0041-0101(87)90265-0

Daly, J.W., Nishizawa, Y., Padgett, W.L., Tokuyama, T., Smith, A.L., Holmes, A.B., Kibayashi, C. and Aronstam, R.S., 1991. 5,8-Disubstituted indolizidines: A new class of noncompetitive blockers for nicotinic receptor-channels. *Neurochem. Res*., **16**, 1213-1218. https://doi.org/10.1007/BF00966698

Demir, A.S., Akhmedov, I.M., Sesenoglu, O., Alpturk, O., Apaydin, S., Gercek, Z. and Ibrahimzade, N., 2001. Conversion of homochiral amines, β-amino alcohols and α-amino acids to their chiral 2-substituted pyrrole derivatives. *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 1*, 1162-1167. https://doi.org/10.1039/B008317H

Demir, A.S., Subasi, N.T. and Sahin, E., 2006. Intermolecular one-pot cyclization of formyl-pyrroles of amino acid esters with norephedrine: stereoselective routes to new tricyclic pyrrole–pyrazine–oxazole fused structures. *Tetrahedron:Asymmetry*, **17**, 2625-2631. https://doi.org/10.1016/j.tetasy.2006.09.020

Dieter, R.K. and Yu, H., 2000**.** A Facile Synthesis of Polysubstituted Pyrroles. *Org. Lett.*, **2**, 2283-2286. https://doi.org/10.1021/ol006050q

Fu, P.P., Xia, Q., Lin, G. and Chou, M.W., 2004. Pyrrolizidine Alkaloids—Genotoxicity, Metabolism Enzymes, Metabolic Activation, and Mechanisms. *Drug Metab. Rev.*, **36**, 1-55. https://doi.org/10.1081/DMR-120028426

Gossauer, A., 2003. Monopyrrolic Natural Compounds Including Tetramic Acid Derivatives. *Prog. Chem. Org. Nat. Prod*., **86**, 9-16. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6029-9_1

Harit, V.K. and Ramesh, N.G., 2016. Amino-functionalized iminocyclitols: synthetic glycomimetics of medicinal interest. *RSC Adv.*, **6**, 109528- 109607. https://doi.org/10.1039/C6RA23513A

Hartmann, T. and Witte, L., 1995. Alkaloids: Chemical and Biological Perspectives. Pelletier, S.W. (Ed.), Pergamon, pp. 155-233.

Haubmann, C., Hubner, H. and Gmeiner, P., 1999. Piperidinylpyrroles: Design, synthesis and binding properties of novel and selective dopamine D4 receptor ligands. *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **21**, 3143-3146. https://doi.org/10.1016/S0960-894X(99)00540-5

Jefford, C.W., Thornton, S.R. and Sienkiewicz, K., 1994. An enantiospecific entry to indolizidines by intramolecular acylation of N-pyrrole esters. *Tetrahedron Letters*, **35**(23), 3905-3908. https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)76698-6

Jefford, C.W., de Villedon de N.F., and Sienkiewicz, K., 1996. The synthesis of chiral 1-(1H-pyrrole) derivatives. *Tetrahedron:Asymmetry*, **7**(4), 1069-1076. https://doi.org/10.1016/0957-4166(96)00111-5

Jones R.A., 1992. In Pyrroles Part II, The synthesis, Reactivity and Physical Properties of Substituted Pyrroles. Wiley and Sons, New York.

Kaiser, D.G. and Glenn, E.M., 1972. Correlation of Plasma 4,5-Bis (p-methoxyphenyl)-2-phenylpyrrole-3-acetonitrile Levels with Biological Activity. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **61**, 1908-1911. https://doi.org/10.1002/jps.2600611205

Lehuede, J., Fauconneau, B., Barrier, L., Ourakow, M., Piriou, A. and Vierfond, J.M., 1999. Synthesis and antioxidant activity of new tetraarylpyrroles. *Eur. J. Med. Chem*., **34**, 991-996. https://doi.org/10.1016/S0223-5234(99)00111-7

Liu, J., Yang, Q., Mak, T.C. and Wong, H.N.C., 2000. Highly Regioselective Synthesis of 2,3,4-Trisubstituted 1*H*-Pyrroles: A Formal Total Synthesis of Lukianol A. *J. Org. Chem.*, **65**, 3587-3595. https://doi.org/10.1021/jo9915224

Massicot, F., Messire, G., Vallee, A., Vasse, J.L., Py, S. and Behr, J.B., 2019. Regiospecific formation of sugar-derived ketonitrone towards unconventional *C*-branched pyrrolizidines and indolizidines. *Org. Biomol. Chem*., **17**, 7066-7077. https://doi.org/10.1039/C9OB01419E

Mattocks, A.R., 1986. Chemistry and Toxicology of Pyrrolizidine Alkaloids. Academic Press.

Michael, J.P., 2004. Indolizidine and quinolizidine alkaloids. *Nat. Prod. Rep*., **21**, 625. https://doi.org/10.1039/B413748P

Ragno, R., Marshall, G., Di Santo, R., Costi, R., Massa, S., Rompei, R. and Artico M., 2000. Antimycobacterial pyrroles: synthesis, anti-*Mycobacterium tuberculosis* activity and QSAR studies. *Bioorg. Med. Chem.*, **8**, 1423-1432. https://doi.org/10.1016/S0968-0896(00)00061-4

Raub, M.F. and Cardellina, J. H., 1992. The piclavines, antimicrobial indolizidines from the tunicate Clavelina picta. *Tetrahedron Lett*., **33**, 2257-2260. https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)74183-9

Rizk, A.F., 1990. Naturally Occurring Pyrrolizidine Alkaloids, CRC Press.

Tamariz, J., Burgueno-Tapia, E., Vazquez, M.A. and Delgado, F., 2018. The Alkaloids: Chemistry and Biology. Knolker, H.J. (Ed.), Academic Press, vol. 80, pp. 1-314.

Tanaka, T., Oba, T., Okamure, N., Watanabe, K., Kurozumi, S. and Naruchi, T., 1980. A Convenient Synthesis of 1, 2, 5-Trisubstituted 3-Benzoylpyrroles. *Synthetic Commun*., **10**(10), 773-789. https://doi.org/10.1080/00397918008061842

Tokuyama, T., Nishimori, N., Shimada, A., Edwards, M.W. and Daly J.W., 1987. New classes of amidine, indolizidine and quinolizidine alkaloids from a poison-frog, dendrobates pumilio (dendrobatidae). *Tetrahedron*, **43**, 643-652. https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)89998-1

Tokuyama, T., Tsujita, T., Garraffo, H.M., Spande, T.F. and Daly, J.W., 1991. Alkaloids from dendrobatid poison frogs: Further pumiliotoxins and allopumiliotoxins and a reassignment of the keto function in pumiliotoxin 307F. *Tetrahedron*, **47**, 5415-5424. https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)80975-3

Wiedenfeld, H., Roeder, E., Bourauel, T. and Edgar, J., 2008. Pyrrolizidine Alkaloids: Structure and Toxicity. V&R Unipress.

Yates, F.S., 1984. In Comprehensive Heterocyclic Chemistry Boulton. A.J., McKillop, A., Eds., Pergamon: Oxford, Vol 2, Part 2A, pp 511.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1538419
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041202 (729-737)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041202 (729-737)

Poli Fonksiyonel Tetra-aril-1,4-dihidropirolo[3,2-b]piroller: Sentezi, Karakterizasyonu ve Fotofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 27.08.2024
Kabul/Accepted: 03.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Polyfunctional Tetra-aryl-1,4-dihydropyrrolo[3,2-b]pyrroles: Synthesis, Characterization and Determination of Photophysical Properties)

Güler YAĞIZ ERDEMİR*

Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Ankara, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Azol sınıfına ait pirollerin dimerleşmesiyle elde edilen 1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirol (DHPP) iskeleti diheteropentalenler adı verilen 10-π-elektronlu heterohalkalı bileşikler arasındadır. Son yıllarda DHPP iskeleti, fotofiziksel özellikleri, termal kararlılığı ve kuantum verimleri nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir. DHPP'lerin türevlendirilmesiyle tetra-aril-1,4-dihidropirolo[3,2-b]piroller (TAPP) elde edilebilmektedir. TAPP yapılarının içerdikleri çok fonksiyonlu yapıların sentezi oldukça önemli olduğu ve bu işlevsel gruplar sayesinde istenilen uygulama alanına göre hibrit yapıların sentezine olanak sağladığı görülmektedir. TAPP'ların literatürde biyo görüntüleme, OLED, OFET, MOFs yapılarında sıklıkla kullanılan boyar sınıfı moleküller olduğu bildirilmektedir. Literatürler ışığında bu çalışmada, metal-organik çerçeveler (MOFs) için aday olabilecek 1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirol (DHPP) ana iskelet yapısı etrafında farklı işlevsel gruplar içeren yeni poli fonksiyonel TAPP yapıları (TAPP1, TAPP2 ve TAPP3) yüksek verimle ve tek kap yöntemi ile sentezlendi. Sentezlenen yapıların karakterizasyonları tamamlandı ve fotofiziksel özellikleri incelendi. Bulgulara göre, TAPP1, TAPP2 ve TAPP3 bileşiklerinin florimetrik ölçümlerinin, çözücü çalışmalarında çözücülerin artan polaritesine bağlı olarak yapıların emisyonunda 30 nm'ye kadar batokromik bir etki oluşturduğu ve TAPP1 yapısının TAPP2 ve TAPP3 yapısına kıyasla kırmızıya kayma meydana getirdiği gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: *Tetra-aril-1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirol; poli fonksiyonel;, fotofiziksel özellikler; floresans boyalar*

Abstract

The 1,4-dihydropyrrolo[3,2-b]pyrrole (DHPP) skeleton obtained by 729derivatization of pyrroles belonging to the azole class is among the 10-π-electron heterocyclic compounds called diheteropentalenes. In recent years, the DHPP skeleton has attracted the attention of researchers due to its photophysical properties, thermal stability and quantum yields. Tetra-aryl-1,4-dihydropyrrolo[3,2-b]pyrroles (TAPP) can be obtained by 729derivatization of DHPPs. It is seen that the synthesis of multifunctional structures contained in TAPP structures is very important and these functional groups allow the synthesis of hybrid structures that can be easily modified according to the desired application area. It is reported in the literature that TAPPs are frequently used dye class molecules in bioimaging, OLED, OFET, MOFs structures. In the light of the literatures, in this study, new poly functional TAPP structures (TAPP1, TAPP2, and TAPP3) containing different functional groups around the main skeletal structure of 1,4-dihydropyrrolo[3,2-b]pyrrole (DHPP), which may be candidates for metal-organic frameworks (MOFs), were synthesized in high yields and by one-pot method. The synthesized structures were characterized and their photophysical properties were investigated. According to the findings, it was observed that fluorimetric measurements of TAPP1, TAPP2, and TAPP3 compounds produced a bathochromic effect up to 30 nm in the emission of the structures depending on the increasing polarity of the solvents in solvent studies, and TAPP1 structure produced a red shift compared to TAPP2 and TAPP3 structure.

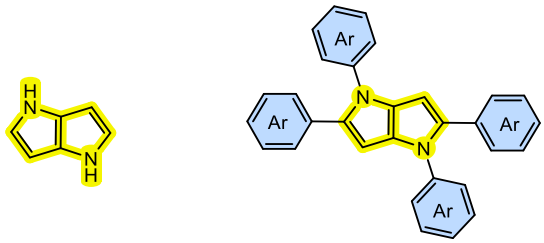
Keywords: *Tetra-aryl-1,4-dihydropyrrolo[3,2-b]pyrrole; poly functional;, photophysical properties; fluorescent dyes*

1. Giriş

Heterohalkalı moleküller bünyelerinde N, O, S gibi atomları bulunduran en az üç üyeli halkalı sistemden oluşan organik moleküllerdir. Heterohalkalı yapıları içeren doğal ve sentetik moleküllerle her alanda karşılaşmak mümkündür. Özellikle hetero atomu azot olan yapılar ilaç sanayisinden malzeme bilime kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir (Sammes 1979, Erdemir and Altundas 2023, Erdemir and Topkaya 2024). Azot hetero atomu içeren beş üyeli heterohalkalı yapılar azoller olarak bilinmektedir. Azol sınıfına ait pirollerin dimerleşmesiyle elde edilen 1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirol (DHPP) iskeleti 1972'de Hemetsberger ve Knittel tarafından keşifedilmiştir (Hemetsberger and Knittel 1972) (Şekil 1). 1,4-Dihidropirolo[3,2-b]piroller, diheteropentalenler adı verilen 10-π-elektronlu heterohalkalı bileşikler arasındadır. Son yıllarda DHPP iskeleti fotofiziksel özelliği, termal kararlılığı ve kuantum verimleri nedeniyle

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Güler YAĞIZ ERDEMİR e-posta/e-mail: guleryagiz@gazi.edu.tr

araştırmacıların dikkatini çeken iskeletler arasında yer almaktadır. Sübstitüe olmamış DHPP halkası küçük bir kromofor sisteminde oldukça zayıf bir emisyona sahiptir. DHPP yapısının 2,5 konumları ile *N* atomları üzerinden farklı sübstitüentlerin bağlanmasıyla tetra-aril-1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirollerin (TAPP) sentezlenebilir. Elektron çekici veya salıcı gruplar içermeyen TAPP'lar görünür mavi emisyonla yalnızca görünür spektral aralığa (λ_{abs} 352nm) ulaşan absorpsiyon gösterirler. 2 ve 5 Konumlarında aromatik halkalar yer aldıkça kromoforun geometrisi daha düzlemsel hale gelir ve bu durum molekülün absorpsiyon ve emisyon dalga boyunda kırmızıya kayma eğilimi göstermesine ve düşük Stokes kayma değerine ulaşmasını sağlar (Domínguez, Montcada et al. 2017, Gutkowski, Azarias et al. 2018, Martins, Vieira et al. 2018, Wu, Wang et al. 2018, Tasior, Koszarna et al. 2019, Zhou, Zhang et al. 2019, Dai, Zhou et al. 2020, Tasior, Vakuliuk et al. 2020, Wang, Qiao et al. 2023; Erdemir, et al. 2024) (Şekil 1).



Şekil 1. DHPP ve TAPP yapılarının genel gösterimi

2 ve 5 Konumlarındaki sübstitüelerin yer alması DHPP motifi ile uç kısımları arasındaki yük dağılımını ayarlar. Uç kısımların elektron çekme özelliklerinin artması hem absorpsiyon hem de emisyonun kırmızıya kaydığı yük transfer durumlarının oluşmasına yol açar. Ayrıca, TAPP'ların 3,6 konumlarının yüksek elektron yoğunluğa sahip olması bu halkaları donör-akseptör çalışmalarında da hedef yapılar haline getirir. Son yıllarda özellikle 2,5 konumlarında güçlü elektron çeken grupların bağlı olduğu TAPP'ların maksimum emisyonunun 600 nm'ye ulaştığı ve TAPP'ların genellikle floresans boyalarda, organik ışık yayan diotlarda (OLED), organik alan etkili transistör (OFET) uygulamalarında, foto dinamik terapi çalışmalarında, biyo görüntülüme de ve metal-organik çerçeve (MOF) çalışmalarında tercih edilmesine neden olmaktadır (1989, Schiedel, Briehn et al. 2001, John, Amalanathan et al. 2011, Liu, Cole et al. 2012, Liu, Cole et al. 2013, Niko, Sasaki et al. 2014, Sasaki, Drummen et al. 2016, Jung, Park et al. 2020, Wössner and Esser 2020). Donör-akseptör sistemlerin geliştirilerek optoelektronik malzemelerin geliştirilmesi ve bu yöndeki literatür isteği her geçen gün daha da artmaktadır. 2024 Yılında Gryko ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği TAPP yapılarına ilişkin bir çalışmada, bir seri TAPP yapısını sentezlediklerini ve sentezlenen TAPP'ların 3,6 konumlarının dönör özelliği ile tetrasiyanoetilenin (TCNE) akseptör özelliği aynı iskelet yapısı üzerinde birleştirilmesi sonucunda yeni D-A tipi TAPP moleküllerini sentezlediklerini bildirmişlerdir. Sentezlenen bu D-A tipi TAPP yapılarının normal TAPP yapılarına kıyasla 100 nm kadar kırmızıya kayma meydana getirdiği ve yeni optoelektronik malzemeler için aday moleküller olabileceği gösterilmiştir (Erdemir, et al. 2024).

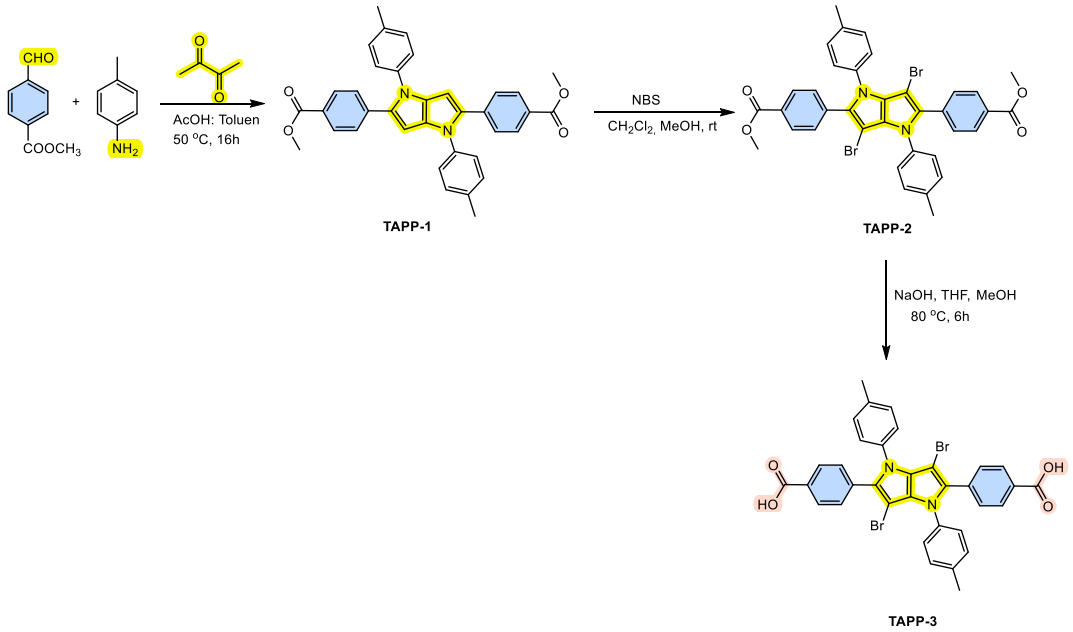
Karboksilik asit uçlu organik moleküllerin türevlendirilerek geniş kullanım alanlarının yanı sıra son yıllarda özellikle metal-organik çerçevelerde (MOF) sıklıkla kullanılan moleküller olduğu saptanmıştır (Gan, Hu et al. 2018). MOF'ların küçük gaz moleküllerini yakalama, ayırma ve depolama konusundaki olağanüstü etkinliğiyle birlikte çözelti fazında da daha büyük konuk molekülleri yakalama ve değiştirme özellikleri sayesinde oldukça dikkat çekici yapılar olduğu görülmektedir (Hawes, CS et al. 2018; Zhao, B et al. 2024). 2018 Yılında MOF adayı olarak yeni TAPP yapılarını düşük-orta verimle sentezledikleri bildirmişlerdir (Hawes, CS et al. 2018). 2024 Yılında yapılan diğer bir çalışmada da yine TAPP yapılarının kullanıldığı daha esnek MOF yapılarını sentezlediklerini ve bu yapıların üstün MOF'ların küçük çözücülere karşı seçici olduğu saptandığı görülmüştür (Zhao, B et al. 2024). TAPP yapılarını içeren MOF yapılarının gaz, çözücü moleküllerini yakalamada güçlü iskeletler olarak yer alsa da bu TAPP yapılarının sentezinin düşük verimle oluşması çalışmalara gölge düşürmektedir. Literatürden alınan bilgiler ışığında bu çalışmada da hem farklı fonksiyonel gruplar üzerinden kolay türevlendirilebilecek poli fonksiyonel hem de metal-organik çerçeveler için farklı absorplama kapasitesi sergileyebilecek 1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirol (DHPP) ana iskelet yapısı etrafında farklı işlevsel gruplar içeren yeni poli fonksiyonel TAPP yapıları (**TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3**) yüksek verimle ve tek kap yöntemi ile sentezlendi. Sentezlenen yapıların karakterizasyonu tamamlandı ve fotofiziksel özellikleri incelendi. Sentezlenen tüm moleküller Şema 1'de gösterilmektedir. Sentez planında ilk olarak, 2,5 konumlarında metil esteri içeren fenil halkalarının yer aldığı ve *N* atomlarında *p*-tolil gruplarının bağlandığı **TAPP1** yapısı oluşturuldu. Sentezlenen **TAPP1** iskelet yapısının 3,6 konumlarının yüksek elektron yoğunluğu özelliği kullanılarak, bromlama tepkimesi sayesinde bu konumlar bromlandı. Ardından elde edilen **TAPP2** yapısındaki metil ester gruplarının bazik ortamda hidrolizi ile 2,5-konumlarındaki fenil halkalarının para konumunda güçlü elektron çekici gruplar olan karboksilik asit içeren **TAPP3** sentezlendi. Sentezlenen tüm türevlerin yapıları IR ve NMR spektroskopisi ile aydınlatılmış olup, fotofiziksel özellikleri toluen, tetrahidrofuran (THF) ve

dimetil sülfoksit (DMSO) çözücüleri içerisinde incelendi. **TAPP3** yapısının içerdiği karboksilik uçların protonlarının uzaklaştırılmasıyla karboksilat uçların halkaya olan elektronik etkisi UV-GB spektrofotometresi ile takip edildi. **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** bileşiklerinin florimetrik ölçümleri ile yapılan çözücü çalışmalarında çözücülerin artan polaritisine bağlı olarak yapıların emisyonlarında batokromik etki oluşturduğu, moleküllerin kendi içindeki karşılaştırmasında ise (**TAPP1** yapısından **TAPP3** yapısına doğru) absorpsiyon ve emisyon ölçümlerinde hipsokromik kaymaların meydana geldiği gözlemlendi.

2. Materyal ve Metot

2.1 Genel Bilgiler

Sentezlerde kullanılan kimyasal ve çözücüler Sigma, Merck, Fluka gibi firmalardan %99 saflıkta temin edilip, herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanıldı. Sentezlenen moleküllerin saflaştırma adımında kullanılan teknik çözücülerde ise gerekli saflaştırma adımları uygulanarak kullanıldı. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumları Gazi Üniversitesi Kimya Bölümü'ndeki Thermo Nicolet ID5 ATR cihazından geçirgenliğe karşı dalga sayısı şeklinde kaydedildi. ^{1}H ve ^{13}C nükleer manyetik rezonans (NMR) spektrumları, Gazi Üniversitesi bünyesindeki 500 MHz Bruker Avance Ultrashield NMR sistemi kullanılarak kaydedildi. NMR çözücüleri olarak döteryumlu kloroform ve dimetil sülfoksit kullanılmış olup, spektrumlar milyonda bir (ppm) birimi üzerinden verildi. NMR spektrumlarındaki protonların birbirleriyle etkileşmesi sonucu oluşan yarılmalar s, d, t ve m ifadeleri sırasıyla singlet, dublet, triplet ve multiplet olarak kısaltıldı, eşleşme sabiti olarak *J* ve birimi olarak Hertz (Hz) verildi. Mor ve ötesi-görünür bölge (UV-GB) spektrumları T80+ spektrofotometresi ile oda sıcaklığında 1 cm'lik küvetler kullanılarak kaydedildi. Floresans spektrumları Hitachi F-2500 spektroflorometresi ile ölçüldü.



Şema 1. TAPP1-3 yapısı için sentez şeması

2.2 Yöntem

TAPP1 Yapısının Sentezi

Metil 4-formilbenzoat (4 mmol) bileşiği asetik asit-toluen (1-1) karışımındaki çözücü sisteminde çözüldü. Elde edilen karışıma sırasıyla *p*-toluidin (4 mmol), katalitik miktarda demir (III) perklorat ve diasetil (2 mmol) ilave edildi ve karışım 50°C'da 16 saat boyunca ısıtıldı. Tepkime tamamlandıktan sonra karışıma 5 mL asetonitril eklendi ve elde edilen katılar süzüldü ve asetonitrilden kristallendirildi (Tasior, Vakuliuk et al. 2020) (Şema 1). Verim %54. FTIR-ATR (cm^{-1}): 3106, 2947, 1713. ^{1}H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm) 7.80 (i, *J* = 8.3 Hz, 4H), 7.19 (i, *J* = 8.2 Hz, 4H), 7.11 (i, *J* = 8.4 Hz, 4H), 7.08 (d, *J* = 8.4 Hz, 4H) 6.39 (s, 2H); 3.81 (s, 6H), 2.31 (s, 6H). ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm) 167.0, 137.9, 137.2, 136.1, 135.6, 132.9, 129.9, 129.5, 127.5, 127.2, 125.2, 95.5, 52.0, 21.1.

TAPP2 Yapısının Sentezi

Elde edilen **TAPP1** (1 mmol) bileşiğinin diklorometan (DCM)-metanol (MeOH) (5:1, 20 mL) çözeltisine 5 mL DCM içerisinde çözünmüş *N*-bromosüksinimit (NBS) (1.6 mmol) ilave edildi ve karışım azot atmosferi altında 1 saat boyunca karıştırıldı. Tepkime tamamlandıktan sonra çözücüsü uzaklaştırıldı ve elde edilen katılar etil asetattan kristallendirildi (Gutkowski, Azarias et al. 2018) (Şema 1).

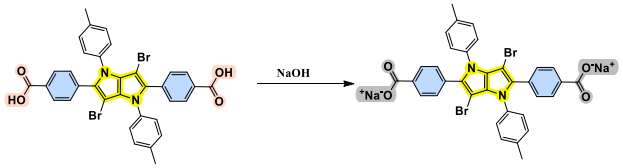
Verim %87. FTIR-ATR (cm^{-1}): 2950, 1709. ^{1}H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm) 7.90 (d, *J* = 8.2 Hz, 4H), 7.32 (d, *J* = 8.2 Hz, 4H), 7.15 (d, *J* = 8.2 Hz; 4H), 7.11 (d, *J* = 8.2 Hz, 4H), 3.88 (s, 6H), 2.36 (s, 6H). ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ (ppm) 166.9, 137.6, 135.5, 134.3, 134.1, 130.7, 129.2, 129.1, 128.5, 128.3, 127.9, 80.9, 52.2, 21.2.

TAPP3 Yapısının Sentezi

TAPP2 (1 mmol) 10 mL'lik tetrahidrofuran (THF)-metanol (1-1) çözeltisinde çözündükten sonra 2 mL içerisinde çözünmüş NaOH (2 mmol) karışıma yavaşça ilave edildi ve karışım geri soğutucu altında kaynatıldı. Tepkime ince tabaka kromatografisi (İTK) ile takip edildi. Tepkime tamamlandıktan sonra, karışım soğutuldu ve 2M'lık hidroklorik asit (HCl) çözeltisi ile asitlendirildi ve elde edilen katılar süzüldü, su ile yıkandı ve metanolden kristallendirildi (Wang, Qiao et al. 2023) (Şema 1). Verim %76. FTIR-ATR (cm^{-1}): 3500-2500, 1682. ^{1}H NMR (500 MHz, DMSO-*d6*) δ (ppm) 12.97 (s, 2H), 7.82 (d, *J* = 8.2 Hz, 4H), 7.34 (d, *J* = 8.2 Hz, 4H), 7.23 (d, *J* = 8.4 Hz, 4H), 7.18 (d, *J* = 8.5 Hz, 4H), 2.30 (s, 6H). ^{13}C NMR (126 MHz, DMSO-*d6*-$CDCl_3$) δ 172.7, 142.2, 139.8, 139.0, 138.9, 135.3, 134.2, 133.9, 133.8, 133.0, 132.5, 85.5, 25.9.

Fotofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

TAPP1-3'lerin absorpsiyon ve emisyon spektrumları toluen, THF ve dimetil sülfoksit (DMSO) çözücülerinde yaklaşık 10^{-6} mol.dm^{-3} konsantrasyon çözeltilerinde alındı. **TAPP3**'ün baz ile titrasyonu için, sabit derişimde (10^{-6} mol dm^{-3}) THF içindeki çözeltisine, sabit derişimde sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin belli hacimleri eklenerek gerçekleştirildi (Şema 2).



Şema 2. TAPP3'ün NaOH ile tepkimesi

3. Bulgular

3.1 Sentez ve Tasarım

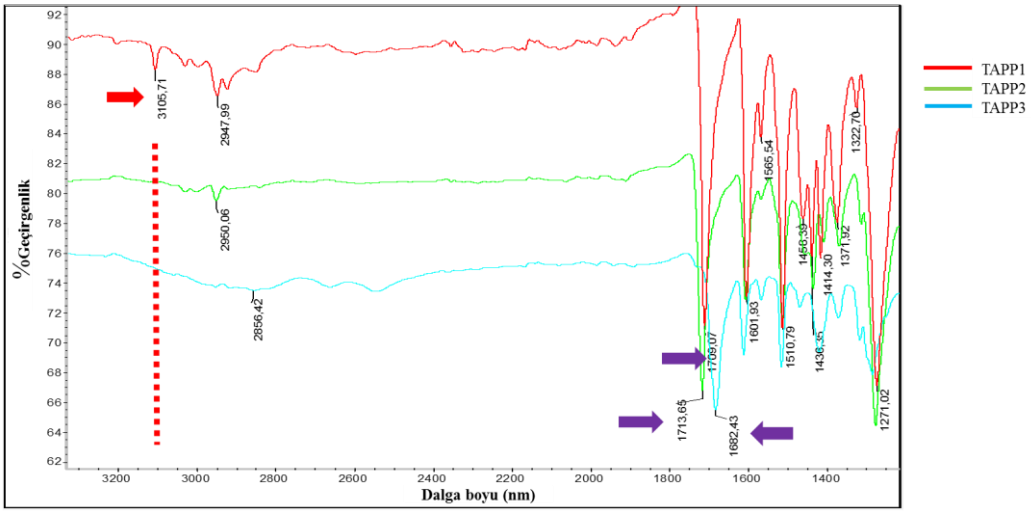
TAPP'lar Şema 1'de gösterilen sentez planı ile hazırlandı. Ticari olarak satın alınan metil 4-formilbenzoat, *p*-toluidin, diasetil bileşikleri TAPP'ların sentezi için başlangıç malzemesi olarak kullanıldı. İlk olarak, metil 4-formilbenzoat, *p*-toluidin, diasetil reaktifleri demir tuzu varlığında tek kap yöntemi ile etkileştirilerek 2,5 konumunda ester gruplarını içeren dimetil 4,4'-(1,4-di-*p*-tolil-1,4-dihidropirolo[3,2-*b*]pirol-2,5-diil)dibenzoat (**TAPP1**) %54 verimle elde edildi. **TAPP1** yapısı literatürdeki sentez planından farklı olarak tek kap yöntemi ile ve yüksek verimle sentezlenerek literatüre kazandırıldı (Antonyová, Tatar et al. 2022). Ardından bu **TAPP1** yapısı sahip olduğu 3,6 konumlarının yüksek elektron yoğunluğu sayesinde *N*-bromosüksinimit (NBS) ile etkileştirilerek, poli fonksiyonel dimetil 4,4'-(3,6-dibromo-1,4-di-*p*-tolil-1,4-dihidropirolo[3,2-*b*]pirol-2,5-diil)dibenzoat (**TAPP2**) molekülü %87 verimle sentezlendi. **TAPP2** yapısının sentezinde TAPP halkasının poli fonksiyonel bir yapıya sahip olması hedeflendi. Hedeflenen **TAPP2** yapısının içermiş olduğu ester grupları üzerinden farklı hibrit yapıların oluşturabilmesinin yanı sıra 3,6 konumlarına bağlanan Br atomları üzerinden de boronik asitlerle paladyum katalizörleri varlığında Suzuki Coupling yapılabilecek fonksiyonel gruplar halkaya bağlandı (Armenise, Malferrari et al. 2016, Ramos, Almodôvar et al. 2022). Bu sayede bu halka üzerinde farklı sentez planlarında kullanılabilecek modifiye gruplar oluşturuldu. Çalışmanın son sentez adımında, **TAPP2** yapısının barındırdığı ester gruplarının hidrolizi ile karboksilik asit grubu içeren 4,4'-(3,6-dibromo-1,4-di-*p*-tolil-1,4-dihidropirolo[3,2-*b*]pirol-2,5-diil)dibenzoik asit (**TAPP3**) yapısı %76 verimle oluşturuldu. **TAPP3** yapısındaki asit protonlarının bazik ortamdaki davranışlarının halka üzerindeki elektronik etkisine absorpsiyon ölçümleri ile takip edildi.

3.2 Yapı Karakterizasyonu

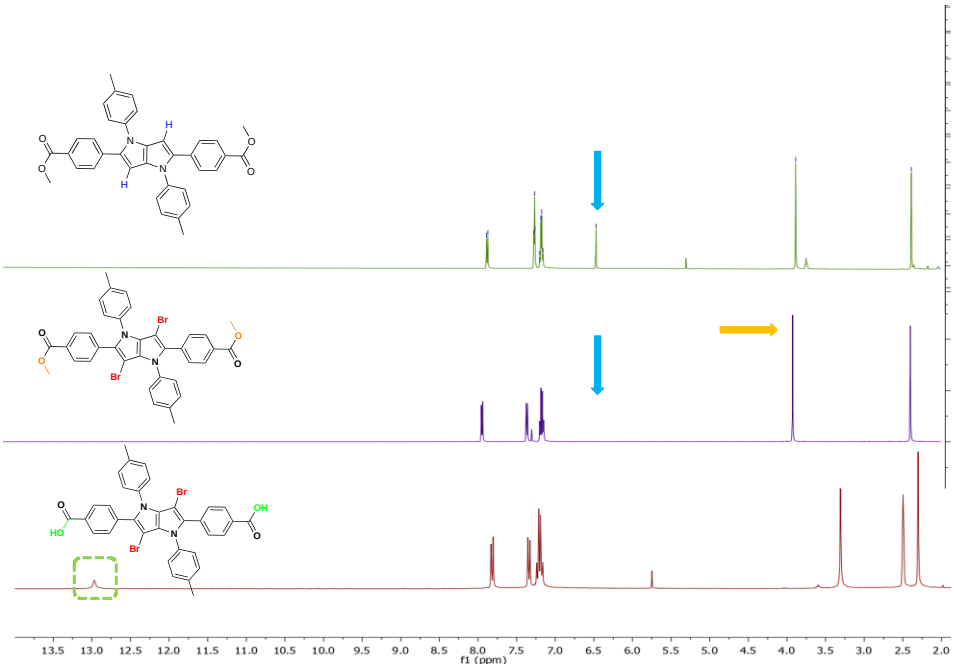
Sentezlenen **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** yapılarının yapı karakterizasyonları FTIR, NMR ve UV-GB spektroskopik teknikleri ile gençleştirildi. Türevlerin yapı aydınlatmalarında öncelikle FTIR spektrofotometresinden yararlanıldı. **TAPP1**'in ana iskelet yapısının 3,6 konumlarında yer alan spesifik =C-H gerilme bandı 3100 cm^{-1} civarında belirlemesi ve yine halkanın 2,5-konumuna bağlı fenil gruplarının ester işlevsel gruplarının konjugasyona bağlı dalga sayısında azalma meydana getirdiği -C=O gerilme bandının 1710 cm^{-1} civarında gözlemlenmesi yapının sentezlendiğini gösterdi. **TAPP1** yapısının 3,6-konumlarındaki spesifik olefinik protonlarının brom atomları ile yer değiştirerek elde edilen **TAPP2** yapısında 3100 cm^{-1} civarındaki olefinik protonlarına ait gerilme bandının yok olması, **TAPP2** yapısının sentezlendiğini doğruladı. Son adımda, **TAPP2** yapısının ester gruplarının hidrolizi ile elde edilen karboksilik asit uçlarının oluşumu 3500-2500 cm^{-1} aralığında beliren geniş ve yayvan -OH gerilme bandı ve -C=O grubunun gerilme bandının 1690 civarına kayması ile doğrulandı (Şekil 2).

Şekil 3'de gösterildiği gibi, **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** yapılarının FTIR'dan alınan bilgilere ek olarak hem ^{1}H hem de ^{13}C NMR ile yapıları tamamen aydınlatıldı. **TAPP1** yapısı için ^{1}H-NMR'dan alınan bilgiler, yapının simetrik olması

sonucunda fenil halkalarına ait protonların simetrik bir şeklide 8-7 ppm aralığında farklı yarılmalar ve ana iskelet yapısı olan pirolopirol halkasına bağlı =C-H protonlarının 6 ppm civarında simetrik olarak rezonansa gelmesi ile netlik kazandı. **TAPP1** yapısının 3,6 konumlarının bromlanması ile elde edilen TAPP2 yapısında, pirolopirol halkasına ait 6 ppm civarındaki spesifik olefinik protonların kaybolması ile yapı aydınlatılırken, son sentez ürünü olan, **TAPP3**'ün yapısı ise **TAPP1/TAPP2** yapılarındaki ester grubuna ait alifatik -OCH_3 protonlarının 4 ppm civarında kaybolup, 12 ppm civarında -COOH grubuna ait asit protonun belirmesi ile yapı doğrulandı. FTIR, ^{1}H NMR ile yapıları aydınlatılan **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** yapıları ayrıca ^{13}C NMR ile de desteklendi. **TAPP2** yapısının, **TAPP3** yapısına dönüşümü sırasında içerdikleri -C=O işlevsel grupların C atomlarının farklı bölgede rezonansa gelmesi ile yapı karakterize edildi. Şekil 3'de gösterildiği gibi **TAPP2** yapısına ait ester -C=O grubuna ait karbonun yaklaşık 166 ppm'de rezonansa gelirken, **TAPP3** yapısında bu grubun karboksilik aside dönüşmesiyle -C=O'e ait karbon pikinin 200 ppm civarında rezonans sinyali vermesi sonucunda yapı tamamen aydınlatıldı (**Şekil SI1-9**).



Şekil 2. TAPP1, TAPP2, TAPP3 yapılarının FTIR spektrumları

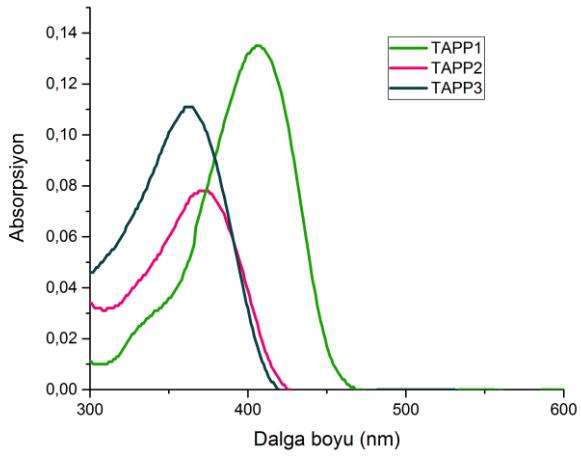


Şekil 3. TAPP1, TAPP2, TAPP3 yapılarının ^{1}H NMR spektrumları

3.3 Fotofiziksel Özellikler

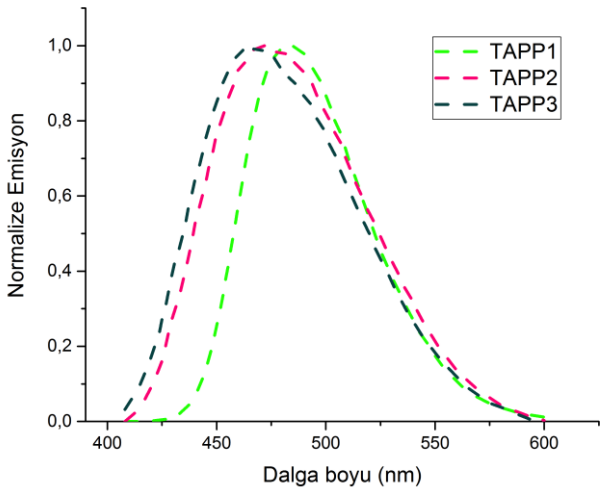
TAPP1, TAPP2 ve **TAPP3**'nın UV-GB absorpsiyon spektrumları toluen, THF, DMSO çözücüleri içinde 10^{-6} mol.dm^{-3} derişimde ölçüldü. Absorpsiyon maksimum değeri (λabs) ve molar absorpsiyon katsayısı (ε) **TAPP1** (toluen için: λabs =402 nm, ε = 45510 M^{-1} cm^{-1}; THF için: λabs =400 nm, ε = 15641 M^{-1} cm^{-1}; DMSO için: λabs =405 nm, ε = 4752 M^{-1} cm^{-1}); **TAPP2** (toluen için: λabs =373 nm, ε = 46435 M^{-1} cm^{-1}; THF için: λabs =370 nm, ε= 34117 M^{-1} cm^{-1}; DMSO için: λabs =372 nm, ε = 2678 M^{-1} cm^{-1}) ve

TAPP3 (THF için: λabs =365 nm, ε = 32490 M^{-1} cm^{-1}; DMSO için: λabs =365 nm, ε = 26266 M^{-1} cm^{-1}) olarak kaydedildi. İlk olarak UV-GB absorpsiyon spektrofotometresi ile farklı dielektrik sabitlere sahip çözücülerin **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** yapıları üzerindeki etkisi incelendi. **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3**'ün toluen, THF, DMSO çözücülerindeki absorpsiyon spektrumları sırasıyla **Şekil SI10-12**'de (ESI†) gösterilmiş ve Çizelge 1'de listelendi. **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3**'ün absorpsiyon değerlerinin çözücünün doğasından neredeyse hiç etkilemediği görüldü. Sentezlenen moleküllerin kendi içindeki karşılaştırmasında ise **TAPP1** yapısından **TAPP3** yapısına doğru absorpsiyonlarında maviye kayma meydana geldiği kaydedildi. **TAPP2** yapısında, brom atomları pi alıcı ve pirolo-[3,2-b]pirol kısmının pi verici motiflerdir. Donör-akseptör sistem oluşturulan **TAPP2** yapısında maviye kayma meydana geldiği bununda brom atomlarının yüksek elektron çekiciliği ile doğru orantılı olduğu anlaşıldı (Şekil 4).

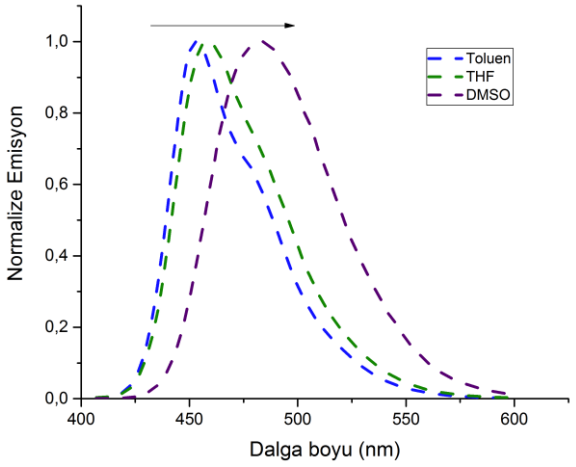


Şekil 4. TAPP1, TAPP2, TAPP3 yapılarının UV-GB spektrumları

Pirolo[3,2-b]piroller, **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3**'ün toluen, THF, DSMO içinde florimetrik ölçümleri de alındı (Şekil 5-8 ve **Şekil SI10-12**). Emisyon spektrumlarına göre, **TAPP1** (toluen: 453 nm; THF: 460 nm; DMSO: 485 nm), **TAPP2** (toluen: 440 nm; THF: 445 nm; DMSO: 475 nm), ve **TAPP3** (THF: 447 nm; DMSO: 467 nm) olarak kaydedildi. **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** yapısına kıyasla maksimum floresans dalga boyunda kırmızıya kayma gözlendi (Şekil 5, Çizelge 1). **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3**'ün emisyon maksimum değerleri incelendiğinde ise artan polariteye (artan dielektrik değerine) bağlı olarak toluenden DMSO'a doğru bir batokromik kayma olduğu gözlendi (**Şekil 6-8** ve **Şekil SI10-12**).



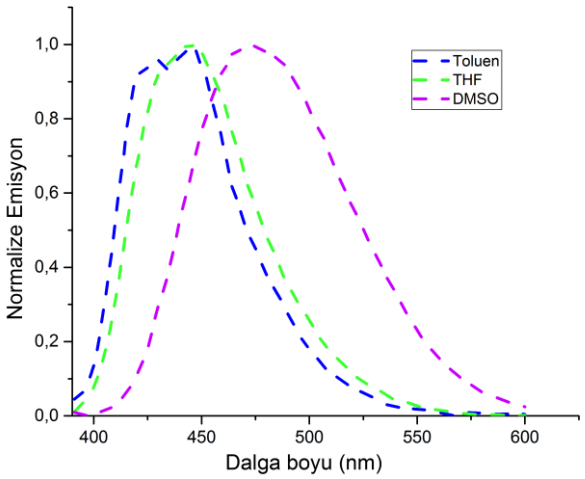
Şekil 5. TAPP1, TAPP2, TAPP3 yapılarının florimetrik spektrumları



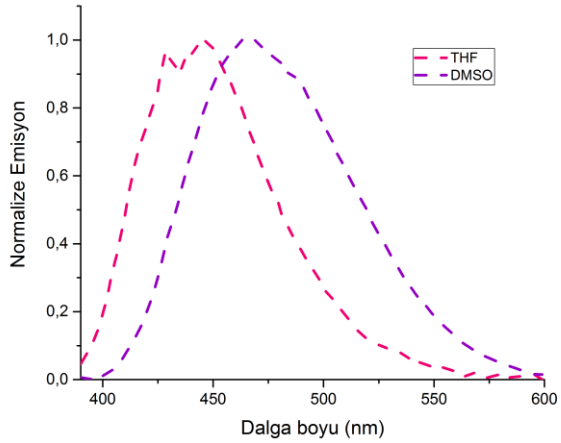
Şekil 6. TAPP1 yapısının toluen, THF, DMSO çözücüleri içerisindeki florimetrik spektrumları

Tablo 1. TAPP1, TAPP2 ve **TAPP3** bileşiklerinin fotofiziksel verileri

Bil.	Çözücü	$\lambda_{max\ (Ab)}$ (nm)	ε @ λ_{max} ($M^{-1}cm^{-1}$)	$\lambda_{max\ (Em)}$ (nm)	Stokes Shift (cm^{-1})
TAPP1	Tol	402	45510	453	2801
	THF	400	15641	460	3261
	DMSO	405	4752	485	4073
TAPP2	Tol	373	46435	440	4832
	THF	370	34117	445	4299
	DMSO	372	2678	475	5829
TAPP3	Tol	-*	-	-	-
	THF	365	32490	447	5025
	DMSO	365	26266	467	5984

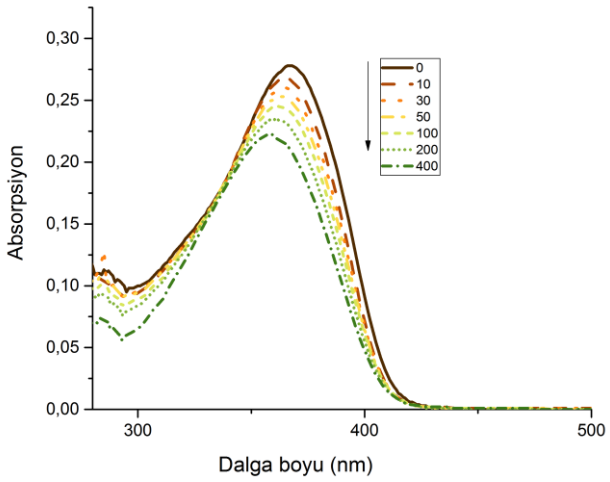


Şekil 7. TAPP2 yapısının toluen, THF, DMSO çözücüleri içerisindeki florimetrik spektrumları



Şekil 8. TAPP3 yapısının THF ve DMSO çözücüleri içerisindeki florimetrik spektrumları

Halojenler, yüksek elektronegatiflikleri sayesinde yapıya bağlanma, kolay ayrılma gibi özellikler sergilemektedir. Daha ağır halojenlerin (Br, I) ağır atom etkisi nedeniyle tekli uyarılmış durumlardan üçlü uyarılmış durumlara geçiş (ISC) sürecini hızlandırabildiği ve bununda floresans özellikleri sönümlemeye neden olduğu bilinmektedir. Ancak son zamanlarda, birkaç çalışma, organik kromoforlara brom atomlarını dahil ederek katı halde alışılmadık bir floresans artışı sergilediğini sentez tasarımlarla karşılaşılmaktadır (Gan, Hu et al. 2018). Ayrıca hem karboksilik asit gruplarını hem de brom atomlarını içeren pirolopirol yapılarının metal-organik çerçevelerde kullanıldığı görülmektedir. Literatürdeki geniş uygulamaları için bu çalışmada 3,6-konumlarında Br atomu içeren **TAPP2** molekülü sentezlendi. **TAPP3** yapısında oluşturulan karboksilik asit uçlar ise organik sentezlerde ya çıkış molekülleri olarak tercih edilen gruplar olarak ya da hedeflenen gruplar olarak literatürde çalışılan fonksiyonel gruplardır. Bu çalışma da hedeflenen **TAPP3**'ün karboksilik asit uçlarını deprotone yapabilmek için $2.5x10^{-3}$ M'lık MeOH içinde hazırlanmış NaOH çözeltisi kullanılarak bazik titrasyon yapıldı ve UV-GB spektrofotometresi ile değişimler takip edildi. **TAPP3** yapısının THF içerisindeki çözeltisine bazik çözeltiden eklendikçe, oluşan karboksilat uçlarının halkadan daha kuvvetli elektron çekebilmesi sağlanarak absorpsiyonunda meydana gelebilecek kaymaları incelendi. TAPP yapılarının 2,5 konumlarında kuvvetli elektron çeken grupların olması TAPP'ları kırmızıya kayma oluşturduğu bilinmektedir. Ancak bu çalışmada elde edilen bulgulara göre, yapıya eklenen bazik çözeltinin miktarı arttıkça deprotasyonla karboksilat uçlar oluşturulmasına bağlı bazik çözelti miktarı arttıkça absoprsiyonunda azalma ve absorpsiyon bandında hipsokromiğe kayma olduğu görüldü (Şekil 9).



Şekil 9. TAPP3 yapısının NaOH bazı ile etkileştirilmesine ait UV-GB spektrumu

4. Sonuçlar ve Tartışma

TAPP yapılarının içerdikleri çok fonksiyonlu yapıların sentezi oldukça önemli olduğu ve bu işlevsel gruplar sayesinde istenilen uygulama alanına göre kolaylıkla modifiye yapılar hibrit yaapıların sentezine olanak sağladığı görülmektedir. TAPP'ların literatürde biyo görüntüleme, OLED, OFET, MOFs yapılarında sıklıkla kullanılan boyar sınıfı moleküller olduğu bildirilmektedir. Literatürler ışığında bu çalışmada, metal-organik çerçeveler (MOFs) için aday olabilecek literatürdeki çalışmalara kıyasla yüksek verimle 1,4-dihidropirolo[3,2-b]pirol (DHPP) ana iskelet yapısı etrafında farklı işlevsel gruplar içeren yeni poli fonksiyonel TAPP yapıları (**TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3**) tek kap yöntemi ile sentezlendi. Sentezlenen yapıların karakterizasyonları tamamlandı ve fotofiziksel özellikleri incelendi. Bulgulara göre, **TAPP1, TAPP2** ve **TAPP3** bileşiklerinin florimetrik ölçümlerinin, çözücü çalışmalarında çözücülerin artan polaritesine bağlı olarak yapıların emisyonunda 30 nm'ye kadar batokromik bir etki oluşturduğu ve **TAPP1** yapısının **TAPP2** ve **TAPP3** yapısına kıyasla kırmızıya kayma meydana getirdiği

gözlemlendi. Özet olarak bu çalışma ile literatüre poli fonksiyonel grup içeren TAPP yapıları kazandırılması ana hedefti. Bu poli fonksiyonel gruplardan karboksilik asit uçlar üzerinden kolaylıkla farklı organik moleküllere dönüşümü sağlanabileceği gibi 3,6-konumlarındaki brom atomları sayesinde de Suzuki, Sonogashira coupling reaksiyonları ile kolay türevlendirilebilecek farklı ve pi konjuge sistemi genişletilebilecek TAPP türevleri literatüre kazandırılabilinir ve böylelikle bu yapıların MOF, OLED, OFET gibi uygulamalarda kullanılabilinecek öncü moleküller olabileceği öngörülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazar tüm etik standartlara uyduklarını beyan eder.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Güler Yağız Erdemir: Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Antonyová, V., et al., 2022. Targeting of the Mitochondrial TET1 Protein by Pyrrolo[3,2-]pyrrole Chelators. I*nternational Journal of Molecular Sciences* **23,**18. https://doi.org/10.3390/ijms231810850

Armenise, N., et al. 2016. Multicomponent Cascade Synthesis of Biaryl-Based Chalcones in Pure Water and in an Aqueous Micellar Environment. *European Journal of Organic Chemistry*, 19, 3177-3185. https://doi.org/10.1002/ejoc.201600095.

Dai, S. X., et al. 2020. Turn-on and color-switchable red luminescent liquid crystals based on pyrrolopyrrole derivatives. *Journal of Materials Chemistry C,* **8**, 32, 11177-11184. https://doi.org/10.1039/D0TC01902J

Domínguez, R., et al. 2017. Pyrrolo[3,2-] pyrrole as the Central Core of the Electron Donor for Solution-Processed Organic Solar Cells. *Chempluschem,* **82,** 7, 1096-1104. https://doi.org/10.1002/cplu.201700158.

Erdemir, G. Y. and A. Altundas 2023. Highly regioselective one-step synthesis of 1-benzyl-5-formyl-1,2,3-triazole-4-carboxylates. *Chemistry of Heterocyclic Compounds,* **59,** 4-5, 267-276. https://doi.org/10.1007/s10593-023-03192-0.

Erdemir, G. Y. and D. Topkaya 2024. Synthesis, Characterization and Evaluating Photochemical Properties of Porphyrin-substituted Azobenzene Structure. *Journal of Fluorescence,* **34,** 1, 275-281. https://doi.org/10.1007/s10895-023-03256-6.

Erdemir, G.Y., et al. 2024. Tetracyanoethylene as a Building Block in the π-Expansion of 1,4-Dihydropyrrolo[3,2-b]pyrroles. *Journal of Organic Chemistry*, ***89***, 21, 15513-15522 https://doi.org/10.1021/acs.joc.4c01555.

Gan, S. F., et al. 2018. Heavy Atom Effect of Bromine Significantly Enhances Exciton Utilization of Delayed Fluorescence Luminogens. *Acs Applied Materials & Interfaces***, 10,** 20, 17327-17334 https://doi.org/10.1021/acsami.8b05389.

Gutkowski, K., et al. 2018. Synthesis and Photophysical Properties of Arylated Diketopyrrolopyrroles. E*uropean Journal of Organic Chemistry*, 47, 6643-6648. https://doi.org/10.1002/ejoc.201701593

Hawes, C.S., et al. 2018. Tetraarylpyrrolo[3,2-b]pyrroles as versatile and responsive fluorescent linkers in metal–organic frameworks. *Dalton Trans.*, **47**, 10080. https://doi.org/10.1039/C8DT01784K

Hemetsberger, H. and Knittel D. 1972. Synthese und Thermolyse yon-a-Azidoacrylestern. *Monatshefte fiir Chemie* **103**, 194-20. https://doi.org/10.1007/BF00912944.

John, C. J., et al. 2011. Intramolecular charge delocalization and nonlinear optical properties of push-pull chromophore 1-(4-N,N-dimethylaminopyridinium) acetic acid bromide monohydrate from vibrational spectra. *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* **78,** 1, 264-272 https://doi.org/10.1016/j.saa.2010.10.005.

Jung, Y., et al. 2020. Latent turn-on fluorescent probe for the detection of toxic malononitrile in water and its practical applications. *Analytica Chimica Acta*, **1095**, 154-161. https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.10.015

Liu, X. G., et al. 2013. Molecular Origins of Optoelectronic Properties in Coumarins 343, 314T, 445, and 522B. *Journal of Physical Chemistry C,* **117,** 27, 14130-14141. https://doi.org/10.1021/jp400614e

Liu, X. G., et al. 2012. Molecular Origins of Optoelectronic Properties in Coumarin Dyes: Toward Designer Solar Cell and Laser Applications. *Journal of Physical Chemistry A*, **116,** 1, 727-737 https://doi.org/10.1021/jp209925y

Martins, L. M., et al. 2018. Improved synthesis of tetraary1-1,4-dihydropyrrolo[3,2-]pyrroles a promising dye for organic electronic devices: An experimental and theoretical approach. *Dyes and Pigments,* **148**, 81-90. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.08.056

Niko, Y., et al. 2014. Design of Weak-Donor Alkyl-Functionalized Push-Pull Pyrene Dyes Exhibiting Enhanced Fluorescence Quantum Yields and Unique On/Off Switching Properties. *Chemistry-an Asian Journal* **9,** 7, 1797-1807. https://doi.org/10.1002/asia.201402088

Ramos, C. I. V., et al. 2022. Diketopyrrolo[3,4-c]pyrrole derivative as a promising ligand for the stabilization of G-quadruplex DNA structures. *Bioorganic Chemistry,* **122**. https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2022.105703

Sammes, P. G. 1979. Comprehensive organic chemistry. London: Pergamon Press, 398-975.

Sasaki, S., et al. 2016. Recent advances in twisted intramolecular charge transfer (TICT) fluorescence and related phenomena in materials chemistry. *Journal of Materials Chemistry C,* **4,** 14, 2731-2743. https://doi.org/10.1039/C5TC03933A

Schiedel, M. S., et al. 2001. Single-compound libraries of organic materials:: Parallel synthesis and screening of fluorescent dyes. *Angewandte Chemie-International Edition*, **40,** 24, 4677. https://doi.org/10.1002/1521-3773(20011217)40:24<4677::AID-ANIE4677>3.0.CO;2-U

Tasior, M., et al. 2019. Fe(iii)-Catalyzed synthesis of pyrrolo[3,2-]pyrroles: formation of new dyes and photophysical studies. *Organic Chemistry Frontiers* **6,** 16, 2939-2948. https://doi.org/10.1039/C9QO00675C

Tasior, M., et al. 2020. Method for the Large-Scale Synthesis of Multifunctional 1,4-Dihydro-pyrrolo[3,2-]pyrroles. *Journal of Organic Chemistry,* **85**, 21, 13529-13543. https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c01665

Wang, L. L., et al. 2023. Synergistic Effects of Lewis Acid-Base Pair Sites-Hf-MOFs with Functional Groups as Distinguished Catalysts for the Cycloaddition of Epoxides with CO2. I*norganic Chemistry*. 62, 9, 3817–3826. https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c04078

Wössner, J. S. and B. Esser 2020. Spiroconjugated Donor-σ-Acceptor Charge-Transfer Dyes: Effect of the π-Subsystems on the Optoelectronic Properties. *Journal of Organic Chemistry,* **85,** 7, 5048-5057. https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c00567

Wu, H. Z., et al. 2018. Pyrrolo[3,2-]pyrrole-Based Quinoidal Compounds For High Performance n-Channel Organic Field-Effect Transistor. *Chemistry of Materials* ,**30,** 20, 6992-6997. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b01791

Zhao, B., et al. 2024. Solvent-Driven Switchable Structural Deformations in a Flexible Metal−Organic Framework with Pyrrolo-Pyrrole−Based Linker. *Crystal Growth & Design*, ***24***, 13, 5447-5455. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c00068

Zhou, Y., et al. 2019. Efficient solution-processed red organic light-emitting diode based on an electron-donating building block of pyrrolo [3,2-] pyrrole. *Organic Electronics,* **65,** 110-115. https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.11.007

Zollinger, H. 1979. Color Chemistry - Synthesis, Properties and Applications of Organic-Dyes and Pigments. **22**: 456-456.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1560061
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041203 (738-756)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041203 (738-756)

The Composite Microbeads of Alginate, Carrageenan, Gelatin, and Poly-(Lactic-co-Glycolic Acid): Swelling, Cefaclor Loading and Release

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 04.10.2024
Kabul/Accepted: 03.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Aljinat, Karragenan, Jelatin ve Poli-(Laktik-ko-Glikolik Asit) Kompozit Mikroboncukları: Şişme, Sefaklor Yükleme ve Salınımı

Buse SEMERCİ ARIKAN[1*], Demet BAYBAŞ[2]

[1] *Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Tıbbi Biyokimya Ana Bilim Dalı, Malatya, Türkiye*
[2] *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyokimya Bölümü, Sivas, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

The controlled release of drugs under desired conditions after attachment to a support material has been of interest to many researchers for some time. The aim of this study was to synthesize composite microbeads consisting of a combination of two (AC, AG, AP), three (ACG, ACP, AGP) or four (ACGP) of the components alginate (A), carrageenan (C), gelatin (G) and/or poly (lactic-co-glycolic acid) (P) and to investigate the usability of the beads for drug delivery. The antibiotic cefaclor (Cef) was chosen as the model drug. Fourier Transform Infrared (FTIR) spectra of drug and drug-free composite microspheres synthesized under different conditions were compared. The effects of synthesis conditions such as component amounts, and cross-linking ion amounts on swelling, retention efficiency and release kinetics of the materials were investigated. Alginate-containing microbeads, which have the highest swelling capacity of 157-981% (AG-A), can be described as hydrogel materials. The addition of PLGA to alginate beads reduces the swelling capacity, whereas the addition of PLGA to composite beads containing other components increases the swelling percentage. As the amount of PLGA added to the ACP beads increases, swelling decreases. The maximum entrapment efficiency of cefaclor in micro-composites varies between 36-93% (A-ACP). All release experiments were performed in simulated gastric fluid at body temperature without enzymes, with fresh solutions under shaking conditions. In general, no burst effect was observed in the release of cefaclor from composite beads. The selected data are fitted to Korsmeyer Peppas, Higuchi drug release models, zero and first-order release kinetics.

Keywords *Cefaclor-release; Alginate; Carrageenan; Gelatin; Poly(lactic-co-glycolic acid)*

Öz

İlaçların bir destek malzemeye tutturulduktan sonra, istenilen koşullarda kontrollü şekilde salımı, bir süredir pek çok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Bu çalışmanın amacı, aljinat (A), karragenan (C), jelatin (G) ve/veya poli (laktik-ko-glikolik asit) (P) bileşenlerden ikisinin (AC, AG, AP), üçünün (ACG, ACP, ACGP) veya dördünün (ACGP) bileşiminden oluşan kompozit mikroboncuklar sentezlemek ve boncukların ilaç salımında kullanılabilirliğini incelemektir. Bu amaçla model ilaç olarak Sefaklor (Cef) antibiyotiği seçilmiştir. Farklı koşullarda sentezlenen, ilaçlı ve ilaçsız kompozit mikrokürelerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektrumları karşılaştırılmıştır. Bileşen miktarları, çapraz bağlayıcı iyon miktarları gibi sentez koşullarının şişme, tutulma verimliliği ve malzemelerin salım kinetiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. %157-981 (AG-A) oranında en yüksek şişme kapasitesine sahip olan aljinat içerikli mikroboncuklar hidrojel malzemeler olarak tanımlanabilir. Aljinat küresine PLGA eklenmesi şişme kapasitesini azaltırken, diğer bileşenleri içeren kompozit boncuklara PLGA eklenmesi şişme %'sini arttırmaktadır. ACP kürelerine eklenen PLGA miktarı arttıkça şişme azalır. Sefaklorun mikro-kompozitlerde maksimum tutulma etkinliği %36-93 (A-ACP) arasında değişmektedir. Tüm salım deneyleri, çalkalama ortamında yeni çözeltilerle, vücut sıcaklığında, enzimsiz simüle edilmiş mide sıvısında gerçekleştirilmiştir. Sefaklorun kompozit boncuklardan salımında genellikle bir patlama etkisi görülmemiştir. Seçilen veriler, sıfırıncı ve birinci dereceden salım kinetiği ile Korsmeyer Peppas ve Higuchi ilaç salım modellerine uymaktadır.

Anahtar Kelimeler *Sefaklor salınımı; Aljinat; Karragenan; Jelatin; Poli(laktik-ko-glikolik asit)*

1. Introduction

Biocomposite drug carriers are materials that have the potential to contribute to significant advances in pharmacology, improving therapeutic efficacy and sensitivity while minimizing side effects, enabling targeted delivery, and minimizing toxicity in the body. Recent research has focused on bionanocomposite structures based on biopolymers, including lipids (including liposomes, lipid emulsions, lipid nanoparticles, solid lipid nanoparticles, and nanostructured lipid carriers), polysaccharides (including alginate and cellulose), and proteins (e.g., gelatin and albumin)

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Buse SEMERCİ ARIKAN e-posta / e-mail: busesemerci2@gmail.com

(Jamroży et al. 2024). Some of the biomaterials are hydrogels. Hydrogel use in drug release is of interest because it retains and systematically releases drugs, and the higher water content helps encapsulate hydrophilic drugs. The drug can be loaded into the hydrogel in two ways: first, the polymer is combined with the drug, followed by polymerization with crosslinking agents. In the second technique, the hydrogels produced are immediately immersed in the drug solution. Swell-modulated, diffusion-controlled, chemical-controlled, and environmentally sensitive releases are some of the ways the drug is loaded into and released from the hydrogel (Kasai et al. 2022).

One of the preferred antibiotics for drug delivery research is cefaclor. Cefaclor is a second-generation cephalosporin antibiotic. It is more effective against gram-negative bacteria and has antibacterial activity against aerobic gram-positive bacteria and some anaerobes. It is derived from the fungus *Acremonium*, commonly known as Cephalosporium, and is used to treat upper and lower respiratory tract infections, acute sinusitis, otitis media and uncomplicated urinary tract infections. Its qualitative and quantitative analysis is performed using various analytical techniques such as HPLC, HTPLC, capillary zone electrophoresis, UV, IR and NMR spectrometry and UPLC-MS-MS. Depending on the manufacturing and storage conditions, the drug undergoes degradation by oxidation, hydrolysis and racemisation.

Environmental factors such as temperature, oxygen, carbon dioxide, humidity, light and pH accelerate the degradation of the drug. Cefaclor, whose chemical formula is $C_{15}H_{14}Cl\ N_3O_4S$ (MW = 367.812 g mol^{-1}), has a maximum plasma concentration of ~23 µg mL^{-1} with the standard release; and this concentration is reached within ~1 hour (h). Although the plasma half-life is less than 1 h under normal conditions, it increases to 3 h in patients with renal failure and 1.5 h on hemodialysis. The serum half-life ranges from 0.6 to 0.9 h, while the biological half-life ranges from 2.3 to 2.8 h (Arsalan 2017). In the literature, some of the support materials used for the controlled release of cefaclor, one of the β-lactam antibiotics, are: polymethylcyanoacrylate (PECA) nanoparticles (Cavallaro et al. 1994); microspheres composed of polyvinylpyrrolidone and ethylcellulose (EC) dispersed in a solvent mixture (Chow et al. 1998); alginate-based polymer matrices (containing alginate, chitosan, hydroxypropyl methylcellulose [HPMC], lactose, citric acid) (Bak et al. 2002); microspheres made from porcine mucus (soluble mucus glycoprotein, S-mucus) and gelatin, a pharmaceutical polymer of natural origin (Ofokansi et al. 2009); ethyl cellulose (EC), cellulose acetate phthalate (CAP) or shellac-coated chitosan-alginate beads (Rasool and Fahmy 2013); floating microspheres composed of HPMC K4M and ethyl cellulose prepared by emulsion solvent evaporation technique (Chilukala et al. 2016); poly(ethyl acrylate, methyl methacrylate and chloro-trimethyl-ammonio-ethyl methacrylate) (ERS) copolymer nanoparticles prepared by conventional spray drying device (Öztürk and Aygül 2020); chitosan, PVA and hydroxyapatite based hydrogel mixtures etc. (Faizan 2024). The last table (in section 3.5) lists the experimental conditions and results of some of the studies mentioned above and compares them with those of the present study. Various new technologies such as microspheres, improved formulations and new drug delivery systems, including extended-release cefaclor tablets, provide protection against degradation and help improve the bactericidal effect and pharmacokinetic profile of the drug (Arsalan et al. 2017). The main aim of this study is to use biomaterials that do not contain toxic substances and can be synthesised in a simple and practical way for the release of a model antibiotic. In Semerci Arıkan's master's thesis, two-component (AC, AG), three-component (ACG, ACP, AGP) and four-component (ACGP) composite beads consisting of different combinations of alginate and carrageenan (A and C, high molecular weight polysaccharides), gelatin protein (G) and/or poly(lactic-co-glycolic acid) (P, a biodegradable polymer) were synthesised, characterised by different methods and used for the release of cefaclor (Semerci, 2019). The characterisation of composite microbeads was presented in another article with the contribution of density functional theory (DFT) calculations (Baybaş et al. 2021).

This article focuses on the above-mentioned AC, AG and ACG beads and their composites formed with PLGA (ACP, AGP, ACGP), cefaclor loading via co-synthesis (bead-Cef) and the usability of the beads for cefaclor release at simulated gastric pH without pepsin. As cefaclor is known to be unstable at intestinal pH (Rasool et al., 2013; Kolesynk et al., 2015) and alginate-containing composites are also unstable under these conditions, the release studies were only performed at pH = 1.2. The presence of cefaclor in the structure was revealed by comparing the FTIR spectra in the study. The swelling behaviour of the microspheres was also investigated. It was observed that the prepared composite beads were hydrogels with high swelling capacity. The study has primarily guided a graduate student towards research. If supported by studies to improve materials and include in vivo experiments, it could also contribute to the country's economy in the field of pharmacology.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

In the study, sodium alginate (A; Carlo Erba, France), carrageenan (C; Sigma-Aldrich, USA), gelatin (G; Merck, Germany) and poly(lactic-co-glycolic acid) (P, resomer, ®RG 503 H, PLGA, lactide glycolide (50:50, MW 24,000-38,000; Sigma-Aldrich, Germany) were used as composite components. Poly(vinyl alcohol) (PVA; Sigma-Aldrich, USA) was used as an emulsifier to form PLGA particles. The cross-linking salts used to form alginate and carrageenan beads were calcium chloride ($CaCl_2.2H_2O$; Carlo Erba, France) and potassium chloride (KCl; Tekkim, Turkey). Cefaclor, an antibiotic belonging to the cephalosporin class, was chosen as the model drug for delivery/release experiments. Pure cefaclor was provided free of charge by Centrient Pharmaceuticals (DSM Sinochem Pharmaceuticals, Rotterdam, The Netherlands). Buffer solutions were prepared using monosodium phosphate (NaH_2PO_4; Sigma-Aldrich, Germany), disodium phosphate (Na_2HPO_4; Sigma-Aldrich, Germany), trisodium phosphate (Na_3PO_4; Merck, Germany) and HCl (Merck, Germany) to provide a gastric pH medium. The analytical purity of all chemicals and double-distilled water used to prepare the solutions in this study was maintained.

2.2. Synthesis of Alginate-Containing Spheres

The synthesis of composite beads by the ionic gelation method was performed using procedures similar to those used in previous publications (Kolesnyk et al. 2015, Torres et al. 2011, Popa et al. 2011). The synthesis conditions for alginate-containing polymeric beads are presented in Tables 1-3. In the tables, the first section, the gel medium, included the volume of water or drug solution (V/mL), the drug concentration in ppm (Cef/µg mL^{-1}) and the mass of polysaccharide (mA, mC), gelatin (mG) and PLGA (mP) in mg. The other section, the bead medium, contained the mass/volume percentages of KCl-$CaCl_2$ salts and PVA in the same volume. More detailed information on the synthesis of drug-free micro-composites can be found in Semerci 2019 and Baybaş et al. 2021.

For the synthesis of beads without PLGA (A, AC, AG and ACG in Table 1), the gels formed by dissolving the components alginate (A), carrageenan (C) and gelatin (G) in water (gel medium) were dropped into the precipitation solution containing $CaCl_2$ and KCl (bead medium) using a syringe. For the synthesis of gels with PLGA (AP, ACP, AGP and ACGP in Table 2), the PLGA solution in acetone was added to the gels containing A, C and G. After mixing the gel solutions until they were homogeneous and evaporating the acetone (gel medium), they were dropped with a syringe into the solution containing $CaCl_2$, KCl salts and polyvinyl alcohol (PVA), resulting in spherical structures (bead medium).

Table 1. Synthesis conditions of micro-beads without PLGA used in swelling experiments

Sample Codes	Gel Medium				Bead Medium	
	V	m_A	m_C	m_G	KCl	$CaCl_2$
	Ml	mg	mg	mg	%	%
A	15	300	-	-	1.0	1.0
AC	10	100	100	-	2.5[1]	3.3[2]
AG	15	150	-	150	1.0	1.0
ACG	15	100	100	100	1.0	1.0

[1]%(Mass/Volume)= 2.5% equivalent 0.3 mol L^{-1} KCl
[1]%(Mass/Volume)= 3.3% equivalent 0.3 mol L^{-1} $CaCl_2$

Spheres containing cefaclor (A-Cef, AC-Cef, AG-Cef, ACG-Cef, AP-Cef, ACP-Cef, AGP-Cef and ACGP-Cef in Table 3) were prepared by co-synthesis, with the gel medium containing cefaclor solution instead of distilled water. Blind trials showed that acetone did not affect the drug concentration in the PLGA beads. To harden and stabilize all the beads, stirring was continued for 2 hours, then the beads were washed with distilled water and stored in the refrigerator. The sizes of the beads dried under laboratory conditions were in the range of 600-1000 micron sieves and were therefore called "microbeads".

2.3. The FT-IR Analysis of Beads with Drug and Drug-Free

The FT-IR spectra (Figure 1) of some of the drug and non-drug beads that were offered the above synthesis conditions were obtained using the KBr pellet technique and the Fourier transform infrared spectrometer (BRUKER TENSOR II) (Baybaş et al. 2021).

2.4. Swelling Experiments

The swelling tests consist of two main parts. First, the swelling properties of the alginate-carrageenan (AC and ACP) composite beads (without and with PLGA) chosen as examples were compared. Then, swelling kinetics experiments were performed with ACP beads in different pH environments (gastric pH, intestinal pH, distilled water and basic pH). Tables 1 and 2 show the synthesis conditions for these composites. In addition, the effect of the synthesis conditions of the ACP beads on their swelling properties was investigated. The amounts of salts (KCl, $CaCl_2$) in the bead medium were varied in the ACP, ACP1-4, and the weight of PLGA (mP) in the gel medium in the ACP3, ACP5-8 coded samples (Table 2). The swelling properties of alginate (A), alginate-gelatine (AG), alginate-carrageenan-gelatine (ACG) and their composites with PLGA (AP, AGP, ACGP) in water were then investigated. The synthesis conditions of these composite spheres are shown in Tables 1 and 2.

Table 2. Synthesis conditions of micro-beads with PLGA used in swelling experiments

Sample Codes	Gel Medium					Bead Medium		
	V/ mL	m_A/ mg	m_C/ mg	m_G/ mg	m_P/ mg	KCl / %	$CaCl_2$ / %	PVA %
ACP	15	100	100	-	*50*	2.5	3.3	3
ACP1	15	100	100	-	50	*0.5*	*0.5*	3
ACP2	15	100	100	-	50	*1.0*	*1.0*	3
ACP3	15	100	100	-	50	*2.0*	*2.0*	3
ACP4	15	100	100	-	50	*5.0*	*5.0*	3
ACP5	15	100	100	-	*20*	2.0	2.0	3
ACP6	15	100	100	-	*100*	2.0	2.0	3
ACP7	15	100	100	-	*200*	2.0	2.0	3
ACP8	15	100	100	-	*400*	2.0	2.0	3
AP	15	*300*		-	*100*	1	1	1
AGP	15	*150*	-	*150*	*100*	1	1	1
ACGP	15	*100*	*100*	*100*	*100*	1	1	1

In all swelling experiments, specific masses of dry beads were weighed at weighing sensitivity and placed into the relevant solution medium, and then the timing was started. The spheres were removed from the environment at certain times, dried in a way that removes the surface water, and weighed. Swelling kinetics plots were presented in Figures 2-5.

2.5. Release Experiments at Gastric pH

Table 3 shows the synthesis conditions of the composite beads used in the release experiments. The specific masses of all synthesized samples (with and without cefaclor) were weighed. Then, 5 mL of the sample was placed in a simulated gastric environment (without enzyme) at pH 1.2 and kept in a shaking incubator at 36 oC for a specified time. It was then removed from this environment and placed in a new 5 mL acidic environment. At the end of the experiment, the cefaclor concentrations of all waste (released) solutions were measured using a UV-Vis spectrophotometer (Shimadzu/UV-1800) (example of a calibration curve in Figure 6) and the cumulative release results were plotted against time (Figures 7-9).

3. Results and Discussion

3.1 Data Analysis

Analysis of swelling behavior is one of the most commonly used methods for characterizing polymers, especially hydrogels. The degree of swelling of the composite beads at any given time can be calculated using a known equation.

$$S = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \quad (1)$$

In equation (1), m_t is the mass of beads removed from the release medium at any time (t), while m_0 is the dry bead mass. This equation can be used to determine the degree of swelling (S) of the composite beads; the percentage swelling (S %) values can be calculated by multiplying the equation by 100. In this study, the value with the highest S % is shown as S_{max} % and taken as the maximum percentage swelling value (Table 4). Schott's second order swelling kinetics equation applies to high swelling polymers (Table 5):

$$\frac{t}{S} = A + Bt \quad (2)$$

$A = \frac{1}{kS_e^2}$, indicates the inverse of the swelling rate in the first case (min g bead g^{-1} water) and $B = \frac{1}{S_e}$, indicates the inverse of the maximum or equilibrium swelling value (S_e) (g bead g^{-1} water). Here, k indicates the swelling rate constant (g water g^{-1} bead min^{-1}) (Schott 1992). Concentrations of cefaclor are easily determined without complexing agents using a UV-Vis spectrophotometer. As there may be shifts in the maximum wavelength of the drug in media of different pH and ionic strength (distilled water, simulated gastric fluid without enzymes), wavelength scans and calibration graphs were plotted separately for each medium. In the synthesis of drug-loaded beads and release studies, one of the components of the composite may interfere with the maximum wavelength of the drug. To eliminate this possibility, beads with and without cefaclor were synthesized simultaneously; wavelength scans of the fluids (background) were performed during the synthesis of the non-drug beads and no interference was found. The UV-Vis spectra (maximum absorbance peaks at 264 nm and 268 nm, no peak) were obtained for Cefaclor in both media, together with that of the background, and the sample calibration graphs are shown in Figures 6a and b. Calibration curves were plotted before each analysis and the calibration curve parameters were found to be repeatable and reproducible. The entrapment efficiency percentage (EE%) of the beads was calculated prior to the composite release tests and the values obtained are shown in Table 6 together with the release values. The EE% was calculated using the following equation (3).

Table 3. Synthesis conditions of micro-beads with or without the drug, used in release experiments

Sample Codes	Gel Medium						Bead Medium		
	V/ mL	$m_{A/}$ mg	$m_{C/}$ mg	$m_{G/}$ mg	$m_{P/}$ mg	*Cef/ µg mL^{-1}*	KCl%	$CaCl_2$%	PVA%
AC-Cef1	10	100	100	-	-	*50*	*2.5*	*3.3*	-
AC-Cef2	10	100	100	-	-	*250*	*2.5*	*3.3*	-
AC-Cef3	10	100	100	-	-	*500*	*2.5*	*3.3*	-
AC-Cef4	10	100	100	-	-	*1000*	*2.5*	*3.3*	-
AC-Cef5	10	100	100	-	-	*5000*	*2.5*	*3.3*	-
AC	10	100	100	-	-	-	*2.5*	*3.3*	-
AC-Cef	10	100	100	-	-	250	*2.5*	*3.3*	-
AC1	10	100	100	-	-	-	*1*	*1*	-
AC1-Cef	10	100	100	-	-	250	*1*	*1*	-
AC2	10	100	100	-	-	-	*2*	*2*	-
AC2-Cef	10	100	100	-	-	250	*2*	*2*	-
AC3	10	100	100	-	-	-	*3*	*3*	-
AC3-Cef	10	100	100	-	-	250	*3*	*3*	-
A	15	*300*	-	-	-	-	1	1	-
A-Cef	15	*300*	-	-	-	250	1	1	-
AC4	15	*200*	*100*	-	-	-	1	1	-
AC4-Cef	15	*200*	*100*	-	-	250	1	1	-
AP	15	*300*	-	-	100	-	1	1	1
AP-Cef	15	*300*	-	-	100	250	1	1	1
ACP9	15	*200*	*100*	-	100	-	1	1	1
ACP9-Cef	15	*200*	*100*	-	100	250	1	1	1
ACP10	10	100	100	-	*50*	-	2.5	3.0	*1*
ACP10-Cef	10	100	100	-	*50*	250	2.5	3.0	*1*
ACP11	10	100	100	-	*100*	-	2.5	3.0	1
ACP11-Cef	10	100	100	-	*100*	250	2.5	3.0	1
ACP12	10	100	100	-	*200*	-	2.5	3.0	1
ACP12-Cef	10	100	100	-	*200*	250	2.5	3.0	1
ACP13	10	100	100	-	100	-	2.5	3.0	*3*
ACP13-Cef	10	100	100	-	100	250	2.5	3.0	*3*
ACP14	10	100	100	-	200	-	2.5	3.0	-
ACP14-Cef	10	100	100	-	200	250	2.5	3.0	-
A	15	*300*	-	-	-	-	1	1	-
A-Cef	15	*300*	-	-	-	250	1	1	-
AG	15	*150*	-	*150*	-	-	1	1	-
AG-Cef	15	*150*	-	*150*	-	250	1	1	-
AG1	15	*200*	-	*100*	-	-	1	1	-
AG1-Cef	15	*200*	-	*100*	-	250	1	1	-
AP	15	*300*	-	-	100	-	1	1	1
AP-Cef	15	*300*	-	-	100	250	1	1	1
AGP	15	*100*	-	*100*	100	-	1	1	1
AGP-Cef	15	*100*	-	*100*	100	250	1	1	1
AGP1	15	*200*	-	*100*	100	-	1	1	1
AGP1-Cef	15	*200*	-	*100*	100	250	1	1	1
ACG	15	*100*	*100*	*100*	-	-	1	1	-
ACG-Cef	15	*100*	*100*	*100*	-	250	1	1	-
ACG1	15	*200*	*50*	*50*	-	-	1	1	-
ACG1-Cef	15	*200*	*50*	*50*	-	250	1	1	-
ACGP	15	*100*	*100*	*100*	100	-	1	1	1
ACGP-Cef	15	*100*	*100*	*100*	100	250	1	1	1

$$\text{EE } \% = \frac{\left(C_0 x \frac{m_b}{m_g}\right) - C_w}{C_0 x \frac{m_b}{m_g}} x100 \qquad (3)$$

Here, C_0 refers to the drug concentration added at the beginning (µg mL^{-1}); C_w refers to the drug concentration (µg mL^{-1}) that comes after washing; m_b refers to the total mass of the synthesized beads, and m_g refers to the mass of the homogeneous gel without forming beads.

For the synthesized composites, release kinetics studies were performed at gastric pH (HCl at pH 1.2) and the variation of the total and percentage release rate of cefaclor, a drug-loaded composite, over time was investigated. All procedures in the release experiments

were also carried out for the inert beads and the absorbance of the solutions obtained was measured as a blank. As indicated in the relevant parts of section 2 (Experimental procedure), partial (fractionated) release experiments were performed using a fresh solution for each period and the total (cumulative) release values were calculated.

Equations (4) and (5) were used in total (ΣR) and percent release (R%) calculations.

$$\Sigma R = \frac{\Delta C.V}{m} \quad (4)$$

In this equation, $\Delta C = C_{Cef} - C_0$; C_0 is the blank concentration value (usually close to zero) calculated from the calibration during the release of the beads without drug (blank); C_{Cef} is the drug concentration (ppm, μg mL^{-1}) calculated during the release of Cefaclor; and V is the volume of HCl added to the release medium (mL), while m is the initial weighed mass (g) of the bead whose release kinetics is being studied. Accordingly, the release value is expressed in the following unit μg drug (g dry bead)-1 released.

$$R\,\% = \frac{\Sigma R}{EE} 100 \quad (5)$$

In this equation, the percentage release (Release %) is calculated as the ratio of the total release value found using equation (4) to the amount of drug loaded on the initial dry bead (μg Cef/g initial dry bead) calculated using equation (3) and is expressed in the unit of μg drug released/initial μg drug (Table 6).

Several release kinetics models have been developed for controlled drug delivery systems. Drug release profiles have been generated using the amount of drug released from drug delivery systems as a function of time (Table 7). The models developed for drug release kinetics include the following.

- Zero-order kinetics
- First-order kinetics
- Higuchi model
- Hixson-Crowell model
- Korsmeyer-Peppas model
- Baker– Lonsdale model
- Hopfenberg model

In this study, the zero-order, first-order, Higuchi and Korsmeyer-Peppas models were applied to the release kinetics data of some composites that showed a high release rate at gastric pH. The mathematical formulae developed for these release kinetics models are as follows:

- Zero-order kinetics formula

$$M_t/M_\infty = k_0\, t \quad (6)$$

- First-order kinetics formula

$$\log(1 - M_t/M_\infty) = k_1\, t \quad (7)$$

- Korsmeyer-Peppas equation

$$M_t/M_\infty = k\, t^n \quad (8)$$

- Higuchi equation

$$M_t/M_\infty = k_H \sqrt{t} \quad (9)$$

In these equations, M_t is the amount of drug released at the time (t), M_∞ is the initial amount of drug, and t is the release time.

In equation (6), k_0 is the zero-order proportional constant. This method is generally used for drugs with low solubility. The amount released is determined by plotting the drug released as a function of time (Dash et al. 2010).

If $M_t/M_\infty = F$ in equation (7), then F is the drug release fraction. While k_1 is the first order rate constant in unit $time^{-1}$, t is the release time. This model is used to describe drug entrapment and absorption. The amount of drug dissolved (released) in the dosage form is determined. It is commonly used to determine the amount of water-soluble drugs (Dash et al. 2010).

In equation (8), k is a characteristic constant for the drug, n is the diffusion exponential and t is the release time. The calculated value of n is used to explain the different release mechanisms. A value of n close to 0.5 indicates that the structure fits Fick's law, while a value of n greater than 0.5 indicates that the drug release is in a structure that fits the non-Fick model. When the release form is a cylinder, the reference value for the n value is 0.45 instead of 0.5 (Dash et al. 2010, Karadağ et al. 2016).

Finally, in Eq. (9), k_H is the release rate constant, which includes the parameters of the polymer structure, and t is the release time. This is the most commonly used method among release kinetics models. In this method, drug release is determined by plotting against the square root of time (Dash et al. 2010).

3.2 The FT-IR Spectra of Beads with Drug and Drug-Free

The authors presented these FT-IR, TGA/DSC, SEM and PZC analyses of beads in a previous study (Baybaş et al. 2021). Here, only the sample FT-IR spectra of drug and non-drug beads are compared. The FT-IR spectra of PLGA (AC, AG, ACG) and PLGA (ACP, AGP, ACGP) composite beads with and without the drug are compared in Fig. 1. The spectrum of cefaclor is also shown in Figures 1a and b. OH and amide NH stretching from broadband series H2O seen in the range of 3680-3000 cm^{-1} in the FTIR spectrum, broadband CO_2 at 2580 cm^{-1}, strong band β-lactam C=O stretching at 1775 cm^{-1}, strong band amide

C=O stretching at 1693 cm^{-1}, strong band carboxylate stretching at 1600 cm^{-1}, weak bands at 1560 cm-1 and moderate bands at 1500 cm^{-1} aromatic C=C, the strong band at CO_2- (symmetrical) at 1365 cm^{-1} defines the sharp peak C-Cl bond at 697 cm^{-1} (Lorenz et al. 1980).

The bands at 1628 and 1425 cm^{-1} observed in the upper AC spectrum in Figure 1a belong to the asymmetric and symmetric carboxyl group strains at 1613 and 1418 cm^{-1} characterized for A. In addition, the shoulder of the C-O bond seen in the alginate spectrum at 1127 cm^{-1} is seen in the AC spectrum at 1127 cm^{-1}. 1262 cm^{-1} SO_3^- group strain of C at 1261 cm^{-1} in the composite; C-O cyclic stretching at 1160 cm^{-1} at the same wavenumber; C-O-C cyclic ether absorption bands at 1070 and 1041 cm^{-1} are located at 1068 and 1041 cm^{-1} in the composite. In addition, low-intensity bands at 973, 930 and 847 cm^{-1} in C are present at 969, 930 and 847 cm^{-1} in AC (Mishra 2015). The differences between AC and ACP composites (Figure 1b) in the region between 1340-1140 cm^{-1} and 1148-950 cm^{-1} prove that PLGA is included in the structure (Sun et al. 2015). It indicates that AC composite beads are a new structure consisting of A and C components and ACP composite beads are a new structure consisting of A, C and P components. When AC and AC-Cef spectra (Figure 1a) are examined with the same graph and similarly ACP and ACP-Cef spectra (Figure 1b), there is no new peak formation or complete disappearance. The retraction of the bands may indicate the interaction between Cefaclor and the composite total functional groups

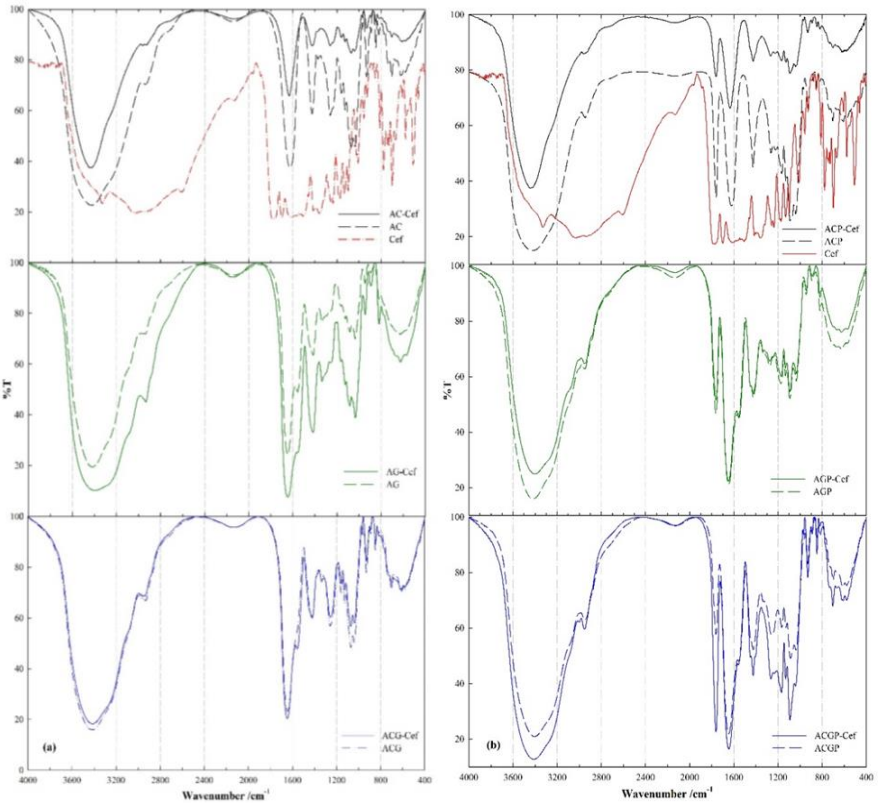


Figure 1. FT-IR spectra of Cef and (a) with PLGA beads, (b) without PLGA beads.

Similarly, only the width of the O-H band is comparable in the group frequency domain for AG. This band is a combination of broad A and narrow G bands. According to Mishra (2015), the fingerprint region for gelatine is in the range of 1650-800 cm^{-1} (Mishra 2015). The amide bands of 1639, 1545 and 1337 cm^{-1}, characterised for G in this region, are seen at 1648, 1556 and 1336 cm^{-1} in the AG composite. The characteristic carboxyl group peaks of alginate at 1613 and 1418 cm^{-1} were also observed in the composite at 1648 (overlap) and 1416 cm^{-1}. In addition, the band with shoulders in the range of 1230-960 cm^{-1} in the alginate spectrum is also seen in the composite with lower intensity. This region also includes the 1336 cm^{-1} peak of G. When the spectra of AG-Cef and AG-coded beads with or without cefaclor are examined, in contrast to the previous figure, there is an elongation in the bands of the active composite. In the spectrum of AG-Cef, the band at 625 cm^{-1}, which is different from AG, may be evidence of cefaclor binding.

When the spectra are looked at holistically, it is understood that the ACP composite interacts most with Cefaclor. The entrapment efficiency also evidences this in Table 6.

3.3 Swelling Tests

3.3.1 The Effect of the Presence of PLGA on Swelling (AC/ACP Beads)

The swelling kinetics of AC and ACP composites in water, whose synthesis conditions are seen in Tables 1 and 2, were compared, and the effect of the presence of PLGA on swelling was investigated (Figure 2a). The swelling capacity of the AC and ACP gels reached the highest value (442% and 466%) at 45 and 60 minutes, respectively. As with all swelling kinetics graphs, this figure exhibits both swelling and syneresis (de-swelling). The rapid decline observed after a certain period can be attributed to the stripping of carrageenan from the composite structure (erosion) and then to the degradation of the entire structure. Because the carrageenan can form a gel not only with 1- and 2-valued cations but also with temperature, this process is reversible.

On the other hand, Alginate can form a gel only with 2-valued cations, and the process is not thermally reversible. However, in the studies of Davidovich-Pinhas and Bianco-Peled both swelling and syneresis were observed in alginate-containing structures. The authors reported this was due to the G (α-L-guluronic-acid) content and Ca^{2+} concentration (Davidovich-Pinhas and Bianco-Peled 2010).

Furthermore, adding PLGA to the composite slightly increased the maximum swelling value and the time required to reach this value. Since there is no significant swelling difference between the AC and ACP composites, the following swelling experiments were performed with the ACP composites.

3.3.1.1 Variation of Swelling with pH

Figure 2b shows the %Swelling-t plots for the ACP coded beads at laboratory temperature and placed in distilled water, gastric pH (pH = 1.2 HCl solution), intestinal pH (pH = 7.4 phosphate buffer, PB) and basic pH (pH = 10.0 NaOH). This sample was chosen because it is the bead with the best homogeneity and physical appearance. After some time, bead breakage and mass loss were observed at all pH values and equilibrium swelling values could not be measured. The highest swelling value (Sm%) for the four different pH environments was > 100 and the highest swelling occurred in water.

The maximum swelling values were 536% after 45 minutes in water, 253% after 30 minutes in HCl, 195% after 15 minutes in phosphate buffer and 186% after 20 minutes in NaOH (Table 4). These different degrees of swelling demonstrated that the ACP beads were pH sensitive.

Table 4. Examples of the swelling test, calculated maximum Swelling% values, and time to achieve this value

Composites	$(S\%)_{max}$	t_{max}/min
Without PLGA		
A	981	45
AC	442	45
AG	157	120
ACG	618	60
With PLGA		
AP	747	180
ACP	464	60
AGP	295	180
ACGP	641	180

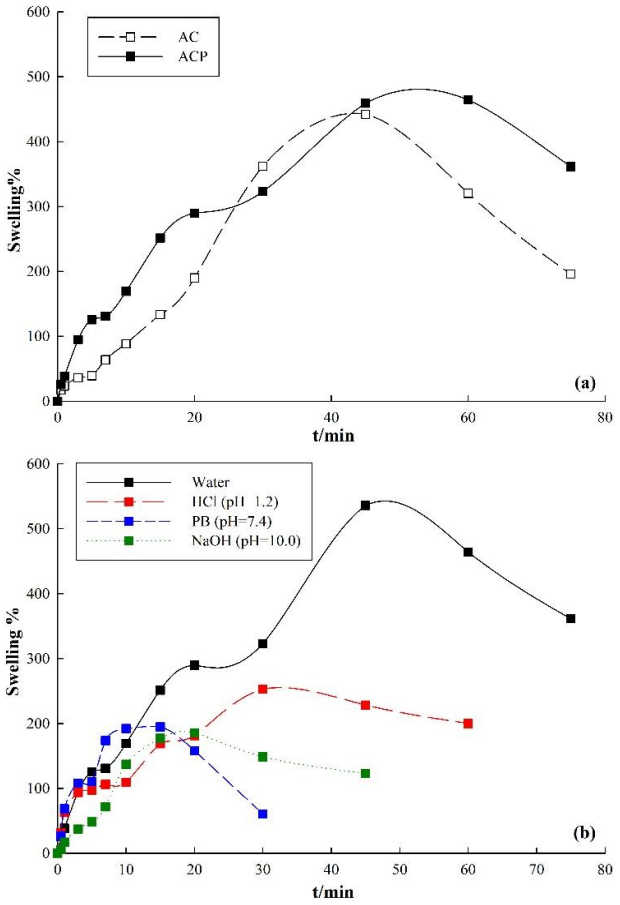


Figure 2. (a) Swelling kinetics of alginate-carrageenan (AC) and alginate-carrageenan-PLGA (ACP) composites at room temperature and in water, **(b)** swelling kinetics of ACP at different pH conditions.

The literature also suggests that alginate beads swell more and are more stable at gastric pH than at intestinal pH. In a study investigating the effect of pH on the swelling values of alginate beads prepared in the presence of Ba^{2+} and Ca^{2+}, hydrogen bonding was reported as the reason for the stability at acidic pH. According to the authors, the pK_a values of the mannuronic and guluronic acid residues of alginate were 3.38 and 3.65, respectively. At a pH below the pK_a of uronic acid, alginate gels are stabilized by intermolecular hydrogen bonding. This is why alginate particles degrade readily in the intestine but are stable in the gastric

environment. The high swelling rate can be attributed to chain expansion at a higher pH than the ionic carboxylate groups of the alginate (Chuang 2017). In addition, the lower degree of swelling in the acidic medium is also explained by the stronger polymer-polymer interactions than polymer-solvent interactions due to the hydrogen bonds formed between the unresolved carboxyl groups in the alginate (Kolesnyk 2015). As the beads were found to be unstable at phosphate buffer and basic pH, subsequent swelling experiments were performed at gastric pH and/or distilled water.

3.3.2 Swelling Properties of the ACP Beads

Firstly, the swelling properties of the ACP-encoded beads, whose synthesis conditions are given in Table 2, were studied in different pH environments. Then, the swelling kinetics of the composite beads prepared under different synthesis conditions (different amounts of KCl and $CaCl_2$ and different PLGA contents) were studied.

3.3.2.1 The Change in Swelling with the Amount of Salt in the Bead Synthesis Medium

Figure 3 (a and b) shows the %Swelling values of ACP and ACP1-4 encoded beads, whose synthesis conditions are given in Table 2, at ambient temperature in HCl and water, respectively. The synthesis conditions show that these composites contain 50 mg of PLGA with equal mass (100 mg) of A and C. For all composites, 3% PVA and varying amounts of salt (KCl and $CaCl_2$) were present in the bead-forming medium. As shown in Figure 3b, ACP was synthesized in environments with different salt ratios (% m/V) (0.3 mol L^{-1} KCl and $CaCl_2$ ≡ 2.5% KCl and 3.3%; $CaCl_2$; can be considered as approximately 3% salt). The swelling kinetics of ACP1 (0.5%), ACP2 (1%), ACP3 (2%) and ACP4 (5%) beads were studied (a) at gastric pH and (b) in water.

The bead with the highest swelling in water was ACP1 (0.5% KCl and $CaCl_2$) (Table 4). This is an expected result considering that the salts have a cross-linking function. However, this is not the case at gastric pH where the ACP1 bead is unstable for long in water and HCl and tends to disintegrate. Although the swelling of the composites in water was higher than in an acidic environment, the beads without degradation had shorter stabilities. Since the beads synthesized in 1% (ACP2) and 2% (ACP3) salt medium at both pH conditions had better stability than those synthesized in other salt ratios, 0.5% and 5% salt environments were not used in the subsequent synthesis processes. It can also be said that ACP (approximately 3% salt) and ACP3 (2% salt) show similar swelling kinetics at gastric pH.

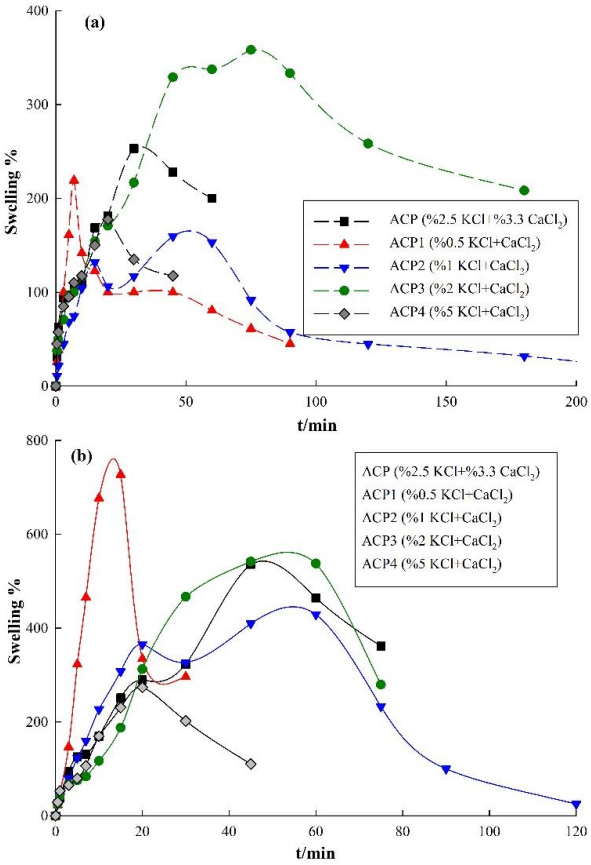


Figure 3. Swelling kinetics of the beads synthesized in different salt environments (a) at gastric pH and (b) in water.

3.3.2.2 The Change in Swelling with the Amount of PLGA added to the Gel

After investigating the effect of alginate-carrageenan mass and salt amount on bead formation and swelling, the effect of PLGA mass was investigated. The A and C masses were chosen as 100 mg, the salt content in the precipitation medium as 2%, and the PVA content as 3%, and then composite beads containing PLGA with different masses were formed (Table 2). Figure 4 shows the %Swelling values of these ACP4 and ACP5-8 coded beads at ambient temperature in (a) HCl and (b) water. Comparing the swelling and stability times in both pH mediums indicates that the ACP3 beads containing 50 mg PLGA showed the best performance. The homogeneous and opaque appearance of these beads has also confirmed this situation.

Adding the hydrophobic PLGA polymer to the environment is expected to reduce swelling. Figures 2(b) and 3 show that the swelling values were higher in water than in acid in Figure 4.

3.3.3 Swelling Properties of the A, AG, ACG, AP, AGP and ACGP Beads

Figure 5 shows the swelling kinetics in water at an ambient temperature of the double and triple (AG, ACG)

composites without PLGA and the triple and quadruple (AGP and ACGP) composites with PLGA, except the AC and ACP. Since the swelling kinetics of the AC and ACP beads were previously presented in Figure 2(a) and the amount of salt in the synthesis conditions was different, they were not included in this comparison.

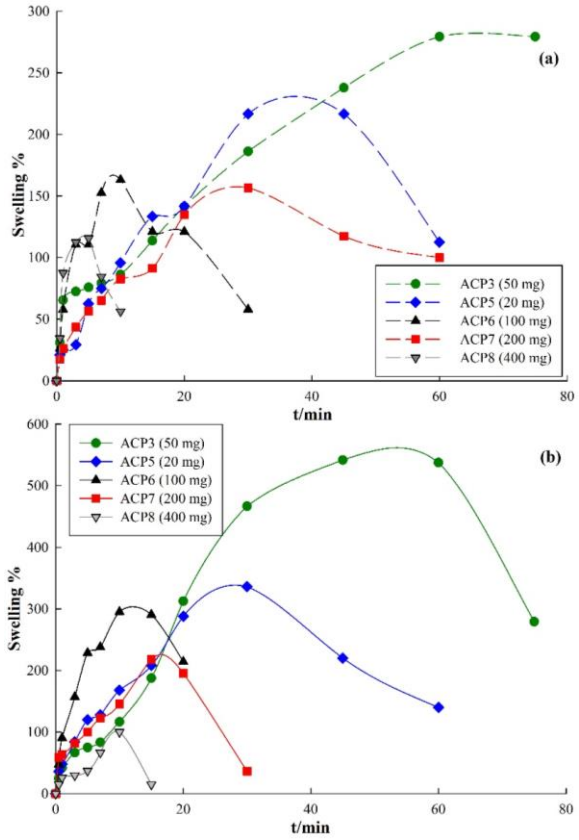


Figure 4. Swelling kinetics of the beads with different PLGA masses in **(a)** gastric pH and **(b)** water.

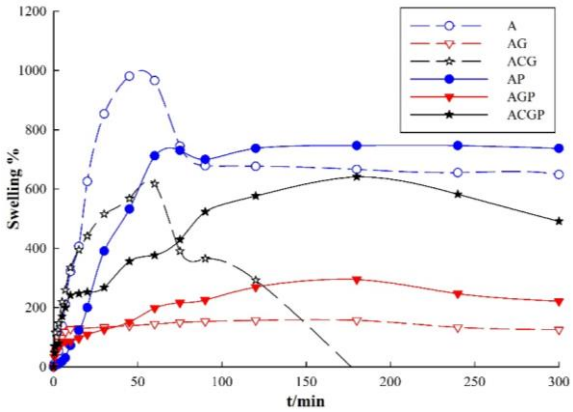


Figure 5. Water swelling kinetics of the beads prepared under the same conditions: alginate (A), alginate-gelatin (AG), alginate-carrageenan-gelatin (ACG), and alginate-PLGA (AP), alginate-gelatin-PLGA (AGP), alginate-carrageenan-gelatin-PLGA (ACG).

A decrease in the mass (syneresis) of the beads without PLGA, except AG (A, ACG), was observed before the end of the 1 hour. In Figure 2a, the rapid decrease in the swelling capacity of the AC gel after reaching the highest value at 45 min can be explained by removing the carrageenan from the composite structure (erosion) and the subsequent degradation of the whole structure. Compared to Figure 4, the gelatine incorporated into the environment reduced this characteristic in A and C and increased the swelling.

The PLGA added to the beads further reduced this degradation property. Investigation of the contribution of PLGA to swelling showed that when added to alginate it increased cross-linking, preventing the alginates from dissolving and reducing swelling. The addition of PLGA to AC (Figure 3a), AG and ACG had the opposite effect and increased swelling. As mentioned above, the hydrophobic nature of PLGA would be expected to reduce swelling. However, all composites can be considered as reversible hydrogels without covalent bonds. In other words, the physical network structures are held together by ionic interactions between polymer chains, hydrogen bonds and/or van der Waals interactions and exhibit a reversible structure. A review by Lin and Metters (Lin et al. 2006) reported that instability and rapid degradability were the common drawbacks of gels formed by physical cross-linking. Adding a hydrophobic group to the structure sometimes prevents water from entering the composite, although sometimes it facilitates water uptake by increasing porosity.

Table 4 shows the maximum percentage swelling values of all the beads whose swelling kinetics were studied at ambient temperature and in water, as well as the times required to reach this value. As can be seen from the table and all the swelling kinetics graphs, all the composite beads containing alginate had a swelling capacity greater than 100%, indicating that all the composites had super-adsorbent hydrogel properties. The degree of swelling of the hydrogel is influenced by van der Waals forces, electrostatic interactions, hydrophobic interactions and hydrogen bonding, while the swelling rate depends on various physicochemical parameters such as porosity and pore structure types. Accordingly, hydrogels are classified into four types as super-porous, macro-porous, micro-porous and non-porous hydrogels (Kasai, et al. 2022). Accordingly, the maximum swelling comparison of the hydrogel composites is A (981%) > AP (747%) > ACGP (641%) > ACG (618%) > ACP (464%) > AC (442%) > AGP (295%) > AG (157%).

In the present study, the difference in swelling between alginate and alginate-carrageenan spheres was contrary to the difference found by Kolesnyk et al. (2015), i.e. AC spheres swelled more than A. The authors stated that this was due to the increase in the amount of κ-carrageenan in the polymer mixture and the decrease in the cross-

linking density due to the increased molar mass of the cross-linked molecules (Kolesnyk et al. 2015). This situation was observed in the present study because the A and AC spheres were prepared in different salt environments.

As can be seen in Table 4, increasing the carrageenan content in the polymer mixture resulted in an increase in the molar mass between the cross-links and a decrease in the cross-link density, which promoted an increase in the degree of swelling of the films. This can be explained by the formation of interlocking networks between the alginate and carrageenan molecular chains, which minimizes the possibility of two adjacent carboxyl groups interacting with Ca^{2+}.

3.3.4 The Second Order Swelling Kinetics Model

Table 5 shows the fit of the beads to Schott's second-order swelling kinetics model and the coefficients obtained from equation (2). The mean and standard deviation (SD) values of the experimental equilibrium swelling data in Figures 2 to 5 are given in the last column of the table. As can be seen in Table 5, the R^2 values of all beads at certain time intervals were very close to 1 and fit the second-order kinetic model. The AC, ACG and ACP beads failed to reach the equilibrium swelling value. The equilibrium swelling values (S_e) obtained using the equation were also compatible with the experimental equilibrium swelling values $(S_e)_{exp}$.

Table 5. Compliance of the PLGA and PLGA composite beads to second-order swelling kinetics model

Composites	R^2	A	B	K	S_e	$(S_e)_{exp}$±SD
Without PLGA						
A	0.987	0.039	0.15	0.58	6.64	6.65±0.13
AC	0.998	1.93	2.16	2.41	0.46	Not
AG1	0.999	2.62	0.62	0.15	1.60	1.40±0.13
ACG1	0.999	1.70	0.14	0.019	7.36	Not
With PLGA						
AP	0.975	0.20	0.14	0.10	6.93	7.18±0.44
ACP1	0.956	3.70	0.15	$6.38x10^{-3}$	6.51	Not
AGP1	0.946	9.73	0.31	$9.67x10^{-3}$	3.26	2.52±0.31
ACGP1	0.967	3.196	0.17	$9.22x10^{-3}$	5.82	5.63±0.58

3.4 Entrapment Efficiency of Cefaclor in Composites and Release Kinetics at Gastric pH

The following subsections deal with the release results of the beads prepared under different synthesis conditions (Tables 3) at gastric pH. Figures 7 to 11 show the % release time plots. Table 6 shows the retention efficiency (EE%), time to reach equilibrium release value (t_e/min), maximum total release (ΣR)max and maximum % release $(R\%)_{max}$ values, i.e. the entrapment and release results for each bead (Figure 6, example calibration curves). The efficiency of Cefaclor to adhere to the beads decreases in the order ACP (93%) > AC (76%) > ACG (46%) = AGP (46%) > AG (40%) > ACGP (39%). Figure 1 also shows that the highest composite drug interaction is ACP-Cef.

3.4.1 Entrapment Efficiency and Release Kinetics of the Alginate-Carrageenan Spheres

In this section, the effects of various parameters on the entrapment percentage and release kinetics of the alginate-carrageenan (AC) composite beads were investigated, and the results were presented.

3.4.1.1 The AC Spheres with Different Drug Concentrations

The synthesis conditions for the AC spheres containing different concentrations of drugs are shown in Table 3. The change in the release kinetics of the beads containing 50 to 500 ppm Cefaclor is presented in Figure 7, and the results are presented in Table 6 (Section 1).

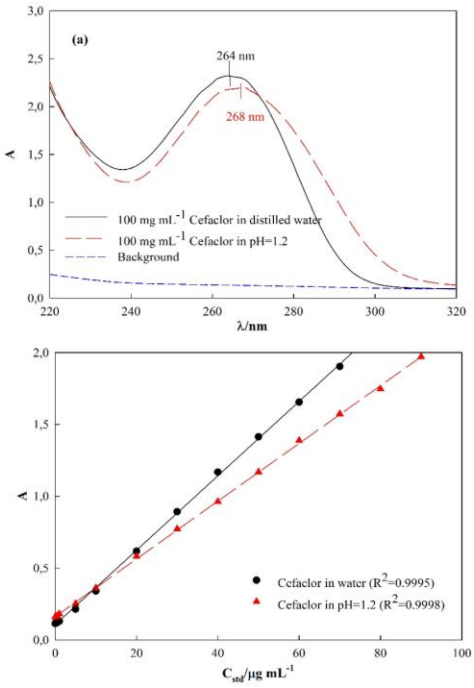


Figure 6. (a) UV absorption spectra of Cefaclor in distilled water and gastric pH, shown with that of the background; **(b)** sample calibration curves.

It was observed that in the samples with different drug concentrations (AC-Cef1-5), the greater the amount of Cefaclor added to the environment, the greater the release. AC-Cef-5 was the sample with the highest drug

concentration and highest release percentage. Thus, it can be concluded that the release percentage is inversely proportional to the retention percentage.

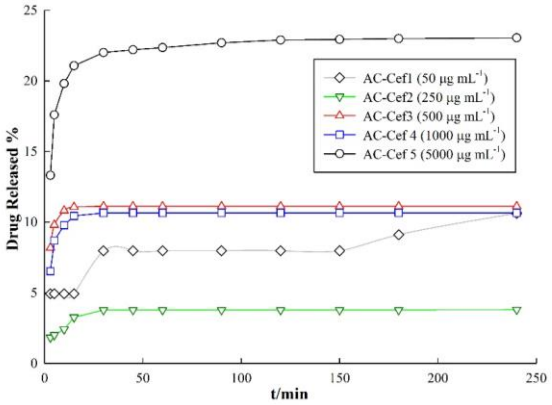


Figure 7. Release profiles of the alginate-carrageenan-Cefaclor (AC-Cef) spheres with different Cefaclor concentrations

Rasool and Fahmy also found that increasing the cefaclor concentration from 5% to 10% (m/V) resulted in better cefaclor retention in chitosan-alginate beads. The burst effect is observed in alginate-containing support materials in the first 30 minutes. The fact that the beads containing chitosan-alginate burst at pH 1.2 within the first 30 minutes. This was attributed to the protonation of the negatively charged carboxyl groups of sodium alginate to form -COOH, thus reducing the degree of crosslinking due to inter-chain electrostatic interactions. In addition, Cefaclor, a small hydrophilic molecule, is highly ionized at this pH; its solubility increases and spreads easily (Rasool and Fahmy 2013). A similar situation is valid for the present study.

3.4.1.2 Release Kinetics of the AC Spheres Containing Different Amounts of Salt

In this section, release experiments were carried out for the AC spheres with different amounts of $CaCl_2$ and KCl in the bead formation medium. The synthesis conditions are shown in Table 3, and the data can be seen in Figure 8a and Table 6 (section 2). The best entrapment between the AC samples with different masses of salt (AC-Cef and AC1-3-Cef) was observed in the AC-Cef composite (2.5% a $CaCl_2$ and 3.3% KCl, salt concentrations = 0.3 mol L^{-1}), while it was observed in the AC3-Cef composite, in which the salt rate was 3%, in the second row. The retention rate increased with cross-linking, as the excess salt in the precipitator medium increased. The AC1-Cef sample, which had the smallest salt mass, had the highest total release percentage. However, when the salt mass was low, the cross-linking rate decreased, and the release became easier. The AC1-Cef and AC2-Cef samples, containing 1% and 2% salt respectively, demonstrated a notable extension in release time, with a sustained increase up to the 240th minute. In a similar vein, the findings of Singh et al.'s study (2021) demonstrated that the quantity of $CaCl_2$ is the pivotal factor in enhancing %EE by augmenting the cross-linking property of Na-Al (Singh et al. 2021). In the studies by Liu et al, the retention of the calcein drug in the alginate-PLGA microparticles was also increased due to the high affinity between the calcium ions used for gelation of the alginate core and calcein (Liu et al. 2016).

Table 6. Entrapment and release results of the composite microbeads

Sample Codes	EE/%	t_e/min	$(\Sigma R)_{max}$/mg cef g^{-1} dry bead	$(R)_{max}$/%
1. Alginate-Carrageenan-Cefaclor beads with different concentration of Cefaclor (μg mL^{-1})				
AC-Cef 1	75.9	240	0.2	10.6
AC-Cef 2	61.5	30	0.3	3.8
AC-Cef 3	56.4	30	1.2	11.1
AC-Cef 4	25.4	30	1.3	10.6
AC-Cef 5	40.5	300	21.7	23.1
2. Alginate-Carrageenan-Cefaclor beads with different amounts (%) of salt (KCl, $CaCl_2$) in the synthesis media				
AC-Cef	61.5	30	0.3	3.8
AC1-Cef	33.9	240	1.3	33.0
AC2-Cef	43.0	240	1.0	23.2
AC3-Cef	45.7	30	0.4	9.0
3. Alginate-Cefaclor and Alginate-Carrageenan-Cefaclor beads with different amounts (mg) of alginate and carrageenan				
A-Cef	36.1	180	2.2	76.4
AC1-Cef	33.9	240	1.3	33.0
AC4-Cef	38.4	180	1.5	50.4
4. Alginate-Carrageenan-PLGA-Cefaclor beads with different PLGA mass (mg)				
AC-Cef	61.5	30	0.3	3.8
ACP10-Cef	48.4	90	1.6	49.8
ACP11-Cef	45.5	90	1.8	77.3
ACP12-Cef	44.8	45	0.9	38.5
5. Alginate-Carrageenan-PLGA-Cefaclor beads with different amounts (%) of PVA in the synthesis media				
ACP10-Cef	35.4	240	1.8	65.5
ACP13-Cef	17.0	60	1.0	69.2
ACP14-Cef	35.7	240	1.3	36.4
6. Alginate-Carrageenan-PLGA-Cefaclor beads with different amounts (mg) of alginate and carrageenan				
AP-Cef	65.5	180	1.4	39.4
ACP9-Cef	93.1	240	1.3	24.1
7. Alginate-Gelatine-Cefaclor beads with different amounts (mg) of alginate and gelatin				
A-Cef	36.1	180	2.2	76.4
AG-Cef	39.6	90	0.4	12.2
AG1-Cef	40.1	180	1.75	60.8
8. Alginate-Gelatine-PLGA-Cefaclor beads with different amounts (mg) of alginate and gelatin				
AP-Cef	65.5	180	1.4	39.4
AGP-Cef	36.1	45	0.8	29.7
AGP1-Cef	45.8	180	1.3	51.9
9. Alginate-Carrageenan-Gelatine-PLGA-Cef beads with different amounts (mg) of alginate, carrageenan and gelatin				
ACG-Cef	45.8	120	0.7	20.0
ACG1-Cef	36.1	120	2.1	90.0
ACGP-Cef	39.1	180	1.8	74.0

3.4.1.3 Release Kinetics of the Composites with Different A and C Masses

In this section, please refer to Table 6, Section 3, which shows the data calculated for the spheres synthesized with different amounts of alginate and carrageenan (see Table 3). Figure 8b shows the release graphs.

Although the AC1-Cef contains 100 mg of alginate and carrageenan in a 10 mL gel medium, it was used in this composite for comparison since it was prepared under conditions equivalent to 150 mg A and C in a 15 mL gel medium.

The entrapment in the samples with different alginate and carrageenan mass ratios was higher in the bead coded AC4-Cef, where the A:C ratio was 2:1, compared to the AC1-Cef, which contained A-C at a ratio of 1:1, and to the A-Cef, which did not contain carrageenan. The addition of C to the medium increased the retention efficiency due to the sulphate groups. The highest total release percentage was observed in the sample A-Cef, which consisted of only alginate and decreased with the addition of C. Besides, while the other two examples showed a burst in 180 minutes, in the sample coded AC1-Cef, the release time exceeded 240 minutes. A similar situation was observed in an α-amylase release study of alginate-carrageenan spheres. The order of cumulative release percentage at pH = 1.8 was reported to be Alg > Alg:Car (3:1) > Alg:Car (1:1) > Alg:Car (1:3). This was explained by the strong electrostatic interactions between the positively charged protein and the negatively charged sulfo- groups of κ-carrageenan, which reduced the drug release in an acidic environment. The same study also reported that microspheres could not be used as a drug release system in the intestine (Kolesnyk et al. 2015).

This result is also in line with previous report confirming that Alginate concentrations have a significant effect on drug release (Singh et al. 2021)

3.4.2 Entrapment Efficiency and Release Kinetics of the Alginate-Carrageenan-PLGA Composite Spheres

In this section, the effects of various parameters on the entrapment percentage and release kinetics of the tri-component composite spheres containing A, C and P were investigated. The results are presented in Figure 9.

3.4.2.1 The ACP Spheres Containing Different Amounts of PLGA

The entrapment efficiency and release data of the beads containing 50, 100 and 200 mg PLGA, whose synthesis conditions are given in Table 3, are presented in Table 6 (section 4) and Figure 9a.

In the samples synthesized by adding different masses of P to the AC sample medium, it was observed that the addition of P (ACP-Cef, ACP1-Cef, ACP2-Cef) reduced the entrapment of the samples compared to the sample coded AC-Cef, where A-C was taken in equal mass and P was not. Although the total composite mass increased from 0.2 g to 0.25, 0.30 and 0.40 g, the best entrapment of the samples with P was observed in the sample coded ACP-Cef, which contained the least PLGA. This indicates that the drug has no affinity for PLGA in the ACP composites. On the other hand, the entrapment levels of the A-Cef (total mass 0.3 g) and AP-Cef (total mass 0.4 g) samples were 36% and 66%, respectively.

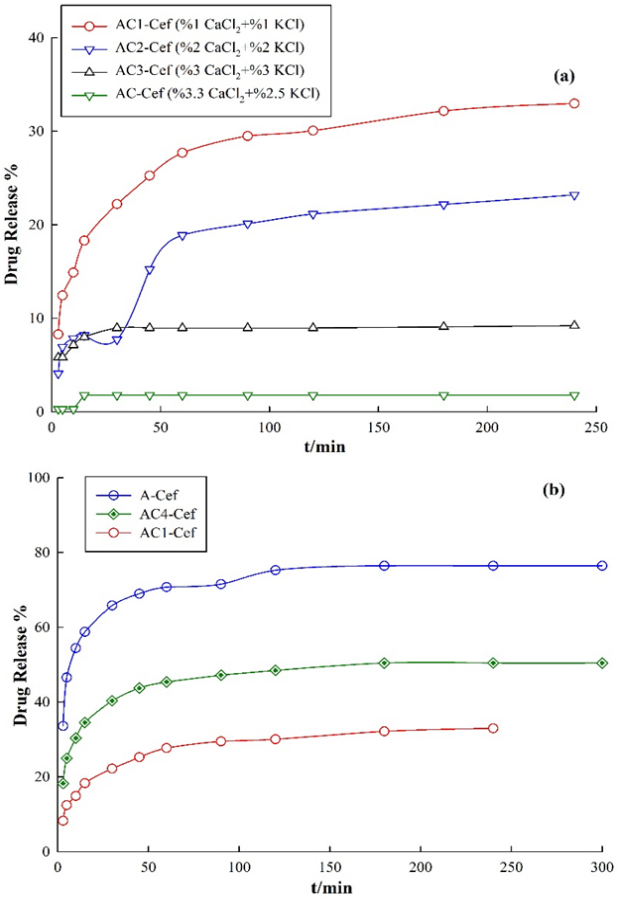


Figure 8. Release plots of **(a)** AC-Cef spheres containing different amounts of salt in the synthesis medium and **(b)** AC-Cef spheres containing different amounts of alginate and carrageenan in the synthesis medium.

Analysis of the composites with different masses of PLGA shows that the sample coded ACP11-Cef, to which PLGA was added at the same mass as A-Cef, gave the best total release percentage, which is also inversely proportional to the entrapment percentage.

In a study investigating the release of calcein from core-shell alginate-poly(lactic-co-glycolic) acid (PLGA) microparticles, alginate-PLGA microparticles were synthesized by double emulsion solvent extraction and

simultaneous ionotropic gelation. While the amount of PLGA was constant in the preparation of PLGA microparticles carrying hydrophilic charges, the particle size and in particular the alginate core size varied. Alginate-PLGA particles with smaller alginate cores showed the slowest drug release (Lio et al. 2016).

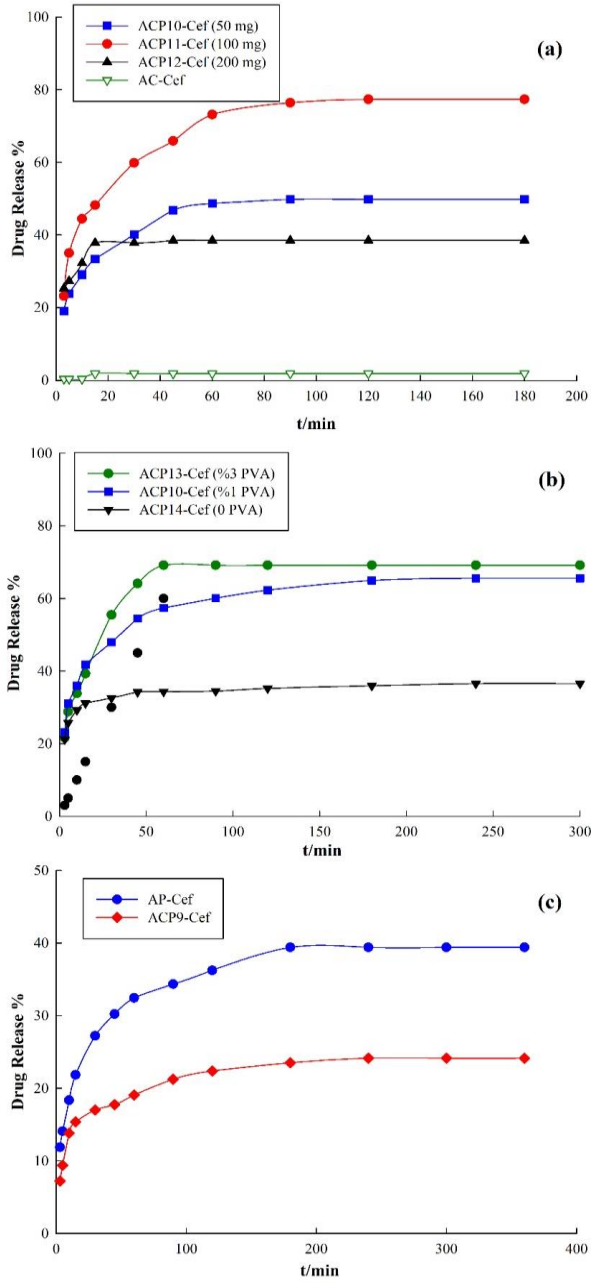


Figure 9. Release plots of **(a)** ACP-Cef composites with different PLGA masses, **(b)** ACP-Cef composites synthesized in different amounts of PVA, and **(c)** AP-Cef and ACP-Cef composites with different masses of A and C.

3.4.2.2 The ACP Composites Synthesized in Media Containing Different Amounts of PVA

In this section, Figure 9b shows the release kinetics graphs drawn for the ACP beads synthesized in the presence of different amounts of PVA in the bead medium (Table 3). In contrast, Table 6-section 5 shows the percentage retention efficiency, the time to reach the maximum release value and the equilibrium release values.

As mentioned above, PVA was added to the synthesis medium to stabilize the PLGA emulsion. The presence of 1% PVA in the medium did not alter the retention efficiency. The percentage release results showed that although the ACP13-Cef synthesized in a medium containing 3% PVA showed the highest release, the sample with 1% PVA encoded ACP10-Cef was more advantageous in terms of delayed release. The high amount of PVA in the medium increased the -OH groups, which reduced cefaclor entrapment and caused bursts in acidic conditions within the first hour. Brough et al. (Brough et al. 2016) also demonstrated that polyvinyl alcohol increased the solubility of itraconazole, a poorly soluble drug.

3.4.2.3 The ACP Composites with Different A and C Masses

The synthesis conditions are given in Table 3 (AP, AP-Cef, ACP, ACP-Cef). The release kinetics graphs drawn for the ACP beads containing different amounts of alginate and carrageenan are shown in Figure 9c and the percentage retention efficiency, the time to reach the maximum release value and the equilibrium release values are shown in Table 6-section 6.

A comparison of the release kinetics of the AP-Cef and ACP9-Cef composites containing different amounts of alginate also shows the contribution of carrageenan to entrapment and release. As shown in Figure 9c and Table 6, the addition of carrageenan to the medium reduced the entrapment efficiency and caused a 15% decrease in release. In addition, it did not contribute significantly to the enhancement of release.

3.4.3. Entrapment Efficiency and Release Kinetics of the Alginate-Gelatine Spheres

In this section, the release kinetics (Figure 10a) of AG spheres containing alginate and gelatin in different masses, whose synthesis conditions are given in Table 3, were studied.

Table 6-section 7 shows that the entrapment percentage did not change significantly, but the release percentage values were quite different for the samples containing different alginate and gelatin (A-Cef, AG-Cef, AG1-Cef). The addition of gelatin to the medium increased the entrapment by only about 4%. In comparison, adding 100 mg of gelatin reduced the release by about 16%, and adding 150 mg reduced the release sixfold. Furthermore, the results for the alginate-gelatin composites were

similar to those for the alginate-carrageenan samples (Figure 8a, Table 6-section 3).

This is due to the strong hydrogen bonds and electrostatic interactions between the alginate and gelatin molecules, as described in the study by Kolesnyk et al. (2015), or between the alginate and carrageenan, as described by Xiao et al. (Xiao et al. 2007).

3.4.4. Entrapment Efficiency and Release Kinetics of the Alginate-Gelatin-PLGA Composites

In this section, the release kinetics were plotted for the spheres synthesized with the AGP content. Figure 10b and Table 6-section 8 show the retention efficiency and release results.

In the samples formed by adding PLGA to the medium with alginate-gelatin, the order of the entrapment percentage was AP-Cef (3:0) > AGP1-Cef (2:1) > AGP-Cef (1:1) according to the alginate: gelatin ratio. This order was AGP1-Cef (2:1) > AP-Cef (3:0) > AGP-Cef (1:1) for the cumulative release percentage.

A general comparison between the samples formed by adding P to A-C and adding P to A-G indicated that the retention efficiency was 93% for the ACP9-Cef synthesized under the same conditions. In comparison, it was 46% for the AGP1-Cef. It is clear that the contribution of C to the composite was higher than that of G, and it depended on the ionic interactions between the $-SO_3^-$ functional groups in the carrageenan and on the positively charged drug in the chloride structure.

3.4.5 Entrapment Efficiency and Release Kinetics of the Alginate-Carrageenan-Gelatin and Alginate-Carrageenan-Gelatin-PLGA Composite Spheres

In this section, the retention efficiency was calculated for the beads synthesized as A-C-G and A-C-G-P. Table 6-9 shows the time to reach the maximum release, total release and release percentage values, and Figures 10c and 10d show the release graphs drawn for the composites, respectively.

The ratio of the components was 1:1:1, the retention efficiency was 46% and the total release was 20% for the triple A-C-G-Cef composites. When the ratio was 4:1:1, the retention efficiency decreased (36%) and the percentage of release increased 4.5 times. This is consistent with previous results indicating that the high alginate beads release a significant amount of cefaclor at gastric pH. The ACGP quadruple composite, prepared in a 1:1:1:1 ratio by adding PLGA to the medium, decreased entrapment and increased release. This can be explained by the interactions between drug-polymer mixtures mentioned above.

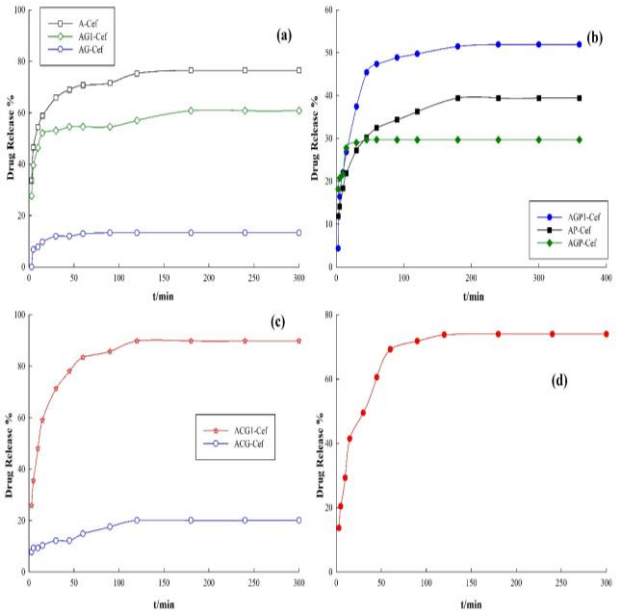


Figure 10. Release profiles of **(a)** AG-Cef composites with different alginate and gelatin masses; **(b)** AGP-Cef composites with different masses of A and G; **(c)** ACG-Cef composites with different masses of alginate, carrageenan, and gelatin; and **(d)** ACGP-Cef composite containing alginate, carrageenan, gelatin, and P.

3.5 Fitness to the Release Kinetics Models and Comparison with the Literature

Considering the total release and total release percentage data, the samples with the highest release values were selected and the suitability of these samples for the following release kinetics models was investigated. The mathematical equations used in the application of the models are presented in section 3.1.

Table 7 shows the R^2 values and release kinetics constants obtained from linearized graphs. The tables indicate that the samples fit with the Korsmeyer-Peppas, first-order release kinetics, and Higuchi release kinetics models, respectively, according to the R^2 values. The fit to the first-order release kinetics observed in porous matrices (i.e., those containing water-soluble drugs), which applies to pharmaceutical dosage forms, is an expected result (Dash et al. 2010).

Especially the n values calculated according to the Korsmeyer-Peppas model show that although it varies according to the composite content, an n value close to 0.5 and below proves that the release kinetics fit the Fick diffusion. For the n values close to 0.5, the water penetration rate was lower than the degradation rate of polymer chains. For the n values below 0.5, the diffusion rate was much lower than the expansion rate of the polymer chains. A recent study developed a sustained release system for cefaclor using nanocomposite clay

(montmorillonite) and polymer (Na-alginate) based microbeads. The study concluded that drug release followed a non-fickian diffusion pattern coupled with matrix release, as indicated by the Korsemeyer-Peppas (n) value of 0.72. As shown in Table 8, the coefficients and release kinetics results obtained from the fitness of the composite beads used in this study to the models above were compared with the other carriers used in the release studies of Cefaclor in the literature. The final section of the table provides the smallest and largest entrapment efficiency (range), maximum release percentage interval, and time interval required to reach this release value for these composites synthesized under different conditions.

A comparison with other carriers can only be made with the study of Chilukala et al. 2016. Floating spheres containing Hydroxyl propyl methylcellulose (HPMC K4M) and ethyl cellulose did not show burst at simulated gastric pH, and the release continued to increase for up to 12 hours. According to the present study, the spheres can only remain in the gastric pH during digestion. The release of Cefaclor from these spheres occurs during digestion, followed by dissipation in the intestinal pH, resulting in the complete release of the drug into the environment. It is noteworthy that no bursts were observed in the initial 30 minutes in a significant number of spheres, which is a notable benefit in release studies.

Table 7. R^2 and release rate constants calculated for various release kinetics models of the samples with the following codes

Sample	Korsmeyer-Peppas			Zero Order		First Order		Higuchi	
Codes	R^2	N	k/ min^{-1}	R^2	k_0/ min^{-1}	R^2	k_1/ min^{-1}	R^2	k_H/ min^{-1}
A-Cef	0.991	0.130	0.271	0.861	0.007	0.982	0.018	0.971	0.160
AC-Cef5	0.907	0.271	0.327	0.832	0.786	0.971	0.052	0.882	0.151
AC1-Cef	0.984	0.438	0.787	0.998	0.009	0.987	0.011	0.958	0.134
ACG1-Cef	0.988	0.388	0.686	0.916	0.031	0.991	0.020	0.996	0.174
AP-Cef	0.991	0.427	0.779	0.942	0.014	0.991	0.017	0.889	0.183
ACP10-Cef	0.995	0.324	0.676	0.909	0.012	0.995	0.011	0.999	0.118
ACP11-Cef	0.985	0.365	0.553	0.905	0.019	0.990	0.023	0.967	0.112
ACP12-Cef	0.991	0.255	0.557	0.885	0.018	0.992	0.011	0.925	0.148
ACGP-Cef	0.999	0.489	0.897	-	-	0.996	0.015	0.999	0.175

Table 8. Comparison of the compounds used in the present study with the release kinetics of some carriers used in Cefaclor release in the literature

Carrier	EE%	Release Time	R%	pH	t/°C	Model	Refer.
Microspheres containing polyvinyl pyrrolidone / ethyl cellulose	38-98	> 1 h Up to 14 h	38-100	Water	37	Higuchi (best fit R^2=0.995, k=64.5	Chow et al. 1998
Microspheres containing alginate and formed by adding chitosan, HMPC, and lactose to alginate	-	3 to 10 h (depending on pH and composite content)	80- 100	1.2 buffer solution, 7.4 buffer solution	37	Zero release kinetics	Bak et al. 2002
Microspheres containing mucin and gelatin	19.5-53.5	First release 10min Up to 4-6 h	60- 100	7.4	37.5	-	Ofokansi et al. 2009
Microspheres coated with chitosan, alginate, ethylcellulose, and cellulose acetate	15	≤ 12 h	60-80	1.2 HCl 4.6 acetate buffer, 6.8 phosphate buffer	37	Korsmeyer-Peppas (in accordance with Fick's law)	Rasool and Fahmy, 2013
Floating spheres containing hydroxypropyl methylcellulose and ethylcellulose	78.8±2.5	12 h	93.6 ± 1.25	1.2 HCl	37±0.5	-	Chilukala et al. 2016
Clay (montmorillonite) and polymer (Na-alginate) based nanocomposite microbeads.	60-90	12 h	50-90 (in 8 h)	pH 1.2 HCl for 2 h and then in 6.8 pH phosphate buffer	37 ± 0.5	Korsmeyer-Peppas	Singh et al. 2021
Alginate (A) Alginate-carrageenan (AC) Alginate-gelatin (AG) Alginate-carrageenan-gelatin (ACG) Alginate-PLGA (AP) Alginate-carrageenan-PLGA (ACP) Alginate-gelatin-PLGA (AGP) Alginate-carrageenan-gelatin-PLGA (ACGP)	36 25-76 40 36-46 66 17-93 36-46 39	180 min 30-300 min 90-180 min 120-180 min. 180 min. 45-240 min. 45-180 min. 180 min	76 4-50 12-61 20-90 39 24-77 30-52 74	1.2 HCl	36	Korsmeyer-Peppas Model, First Order Release, Higuchi Model	This study

4. Conclusion

In the present study, novel composite structures were synthesized by incorporating carrageenan, gelatin, and PLGA into and/or on the surface of the egg-box cage structures in the presence of alginate $CaCl_2$. The structural characterization of these composite spheres was presented in a separate study. In this study, the focus was on comparing the FTIR spectra of medicated and drug-free composite beads for characterization purposes, and it was concluded that the composite with the highest Cef was ACP. The study also investigated the swelling kinetics of pH-sensitive composites and the release of the Cefaclor antibiotic agent at gastric pH.

An examination was conducted to assess the stability of the composites under various pH conditions, specifically at gastric (pH = 1.2, HCl) and intestinal (pH = 7.4, phosphate buffer) levels. The mass loss at the conclusion of the 14th day at acidic pH was observed to range from 9% to 76%, while the structures were found to be fully dispersed by the third day in the buffer medium.

In these swelling experiments, no significant contribution of PLGA to AC to swelling was observed. The change in the swelling amount (percentage swelling) of the ACP beads in the swelling medium follows the trend: water > HCl (pH 1.2) > PB (pH 7.4) > NaOH (pH 10.0). The highest swelling value (641%) was observed for the ACGP-coded bead in water. The swelling values of the A and AP beads in water were higher (981% and 747%, respectively).

The capture efficiency of the Cefaclor loaded by synthesis into spheres containing only alginate (A) was 36%. This efficiency increased to 76% when carrageenan was added to the medium, to 40% when gelatin was added, and to 46% for the triple composites. A similar trend was observed in the binary composites containing only alginate and PLGA (P), with a capture efficiency of 66%, which increased to 93% when carrageenan was added to the medium (ACP).

The time taken to reach the maximum release balance was 3 hours in the spheres containing only A, while it was 3 hours in the AG and ACG and up to 5 hours in the AC spheres. The efficiency was found to be 46% when gelatin was added (AGP) and 39% in the quaternary composite. While the time taken to reach the maximum release balance was 3 hours in the AP-only, AGP, and ACGP spheres, it was 4 hours in the ACP spheres.

Cefaclor is currently known to be sold in extended-release tablets. In this study, the composites obtained were not compared with these tablets; Cefaclor was used only as a sample antibiotic. The focus of the study is to prepare triple and quadruple composite beads containing alginate, investigate their swelling characteristics, and check their usability in an application area. The release of Cefaclor at acidic pH was significantly reduced, and the burst effect of the drug was reduced compared to some materials in the literature and the alginate/Ca2+ microspheres. Therefore, it can be concluded that the microspheres synthesized are efficient for release at the stomach pH, which remains effective for an antibiotic such as Cefaclor.

The most significant limitation of the study is that it could not be conducted in an artificial intestinal environment. In future studies, corrections should be made to increase the durability of the materials in the pH = 7.4 environment. In addition, the materials should be studied in an in vitro environment.

Declaration of Ethical Standards

This study is derived from the master thesis (thesis number: 562048) titled Cefaclor Release with Biodegradable Polymer/Polysaccharide Composites completed by Buse SEMERCİ ARIKAN on 09/07/2019 under the supervision of Assoc. Prof. Dr. Demet BAYBAŞ.

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorhip Contribution Statement

Author: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft, supervision and writing – review and editing.

Data availability Statement:

The raw/processed data required to reproduce these findings cannot be shared due to technical or time limitations.

Competing Interests:

Authors declare not to have financial or non-financial interests directly or indirectly related to the work submitted for publication.

Acknowledgment:

We would like to thank Sivas Cumhuriyet University CÜBAP research fund for their support for this study. In addition, the authors would like to thank Centrient Pharmaceuticals (DSM Sinochem Pharmaceuticals, Rotterdam, Netherlands) for providing Cefaclor.

5. References

Arsalan, A., Ahmad, I., Ali, S., A. 2017. in. Berthardt, L,V, (ed). Advances in Medicine and Biolog: Nova Science Publishers Inc., 123**.** pp 1-52.

Bak, S., Lee, J.Y., Song, H., Hwang, J.H. and Lee, S.J. (2002). Controlled release and stabilization of Cefaclor from alginate-based matrices for oral delivery design. *Journal of Pharmaceutical Investigation,* **32**, 327-330.

Baybaş, D., Serdaroğlu, G. and Semerci, B. 2021. The composite microbeads of alginate, carrageenan, gelatin, and poly (lactic-co-glycolic acid): Synthesis, characterization and Density Functional Theory calculations. *International Journal of Biological Macromolecules*, **181,** 322-338.

https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.128

Brough, C., Miller, D.A., Keen, J.M., Kucera, S.A. and Lubda, D, 2016. Use of polyvinyl alcohol as a solubility-enhancing polymer for poorly water soluble drug delivery (Part 1). *An Official Journal of the American Association of Pharmaceutical Scientists,* **17(1)**, 167-179.
https://doi.org/10.1208/s12249-015-0458y

Cavallaro, G., Fresta, M., Giammona, G., Puglisi, G. and Villari, A. 1994. Entrapment of β-lactams antibiotics in polyethylcyanoacrylate nanoparticles: Studies on the possible in vivo application of this colloidal delivery system. *International Journal of Pharmaceutics*, ***111*(1)**, 31-41.
https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90399-9

Chilukala,S., Bontha, V.K., Pragada, R.R., 2016. In vitro and in vivo characterization of cefaclor loaded floating microspheres. *Indo American Journal of Pharmaceutical Research* **6(04)**, 5277.

Chow, A.H., Ho, S.S., Tong, H.H. and Ma, H.H. 1998. Parameters affecting in-liquid drying microencapsulation and release rate of cefaclor. *International journal of pharmaceutics*, ***172*(1-2)**, 113-125.
https://doi.org/10.1016/S0378-5173(98)00199-9

Chuang, J.J., Huang, Y.Y., Lo, S.H., Hsu, T.F., Huang, W.Y., Huang, S.L. and Lin, Y.S. 2017. Effects of pH on the shape of alginate particles and its release behavior. *International Journal of Polymer Science*, ***2017*(1)**, 3902704.
https://doi.org/10.1155/2017/3902704

Dash, S., Murthy, P.N., Nath, L. and Chowdhury, P. 2010. Kinetic modeling on drug release from controlled drug delivery systems. *Acta Poloniae Pharmaceutica, **67*(3)**, 217-223.

Davidovich-Pinhas, M. and Bianco-Peled, H. 2010. A quantitative analysis of alginate swelling. *Carbohydrate Polymers*, ***79*(4),** 1020-1027.
https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.036

Faizan, M., Javed, M., Fatima, M., Bahadur, A., Iqbal, S., Mahmood, S. and Ibrahium, H.A. 2024. Incorporation of silane-modified halloysite into hydrogels for Cefaclor drug Release: Potential for wound healing application. *Inorganic Chemistry Communications*, ***163*,** 112351.
https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112351

Jamroży, M., Kudłacik-Kramarczyk, S., Drabczyk, A., and Krzan, M., 2024. Advanced Drug Carriers: A Review of Selected Protein, Polysaccharide, and Lipid Drug Delivery Platforms. *International Journal of Molecular Sciences, **25 (2)**,* 786.
https://doi.org/10.3390/ijms25020786

Karadağ, E., Ödemiş, H., Kundakçi, S. and Üzüm, Ö.B. 2016. Swelling characterization of acrylamide/zinc acrylate/xanthan gum/sepiolite hybrid hydrogels and Its application in sorption of janus green B from aqueous solutions. *Advances in Polymer Technology*, ***35*(3)**, 248-259.
https://doi.org/10.1002/adv.21547

Kasai, R.D., Radhika, D., Archana, S., Shanavaz, H., Koutavarapu, R., Lee, D.Y. and Shim, J. 2023. A review on hydrogels classification and recent developments in biomedical applications. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, ***72*(13)**, 1059-1069.
https://doi.org/10.1080/00914037.2022.2075872

Kolesnyk, I., Konovalova, V. and Burba, N.A. 2015. Alginate/κ-carrageenan microspheres and their applicatıon for protein drugs controlled release. *Chemistry and Chemical Technol*ogy, **9(4)**, 485.

Lin, C.C. and Metters, A.T. 2006. Hydrogels in controlled release formulations: network design and mathematical modeling. *Advanced drug delivery reviews*, **58**(12-13), 1379-1408.
https://doi.org/10.1016/j.addr.2006.09.004

Likhariya, M., Trivedi, D., Bhadoria, J., and Modi, A., 2021. Formulation and evaluation of cefaclor extended-release tablet. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics,* **11(6-S),** 33-36.
https://doi.org/10.22270/jddt.v11i6-S.5193

Lio, D., Yeo, D. and Xu, C. 2016. Control of alginate core size in alginate-poly (Lactic-Co-Glycolic) acid microparticles. *Nanoscale Research Letters*, **11**, 1-6.
https://doi.org/10.1186/s11671-015-1222-7

Lorenz, L.J., Cefaclor. in: Florey, K. (ed.) 1980. Analytical profiles of drug substances, Academic Press, New York, vol. 9, 107–123.
https://doi.org/10.1016/S0099-5428(08)60138-0

Mishra, M., (Ed.) 2015. Handbook of encapsulation and controlled release. CRC press. New York.

Ofokansi, K.C,. Okorie, O. and Adikwu, M.U. 2009. Biodegradable microspheres based on gelatin–porcine mucin admixtures: In vitro and in vivo delivery studies*. Biological and Pharmaceutical Bulletin*, ***32*(10)**, 1754-1759.
https://doi.org/10.1248/bpb.32.1754

Öztürk, A.A. and Aygül, A. 2020. Design of cefaclor monohydrate containing nanoparticles with extended antibacterial effect by nano-spray dryer: A nanoenglobing study. *Journal of Research in Pharmacy, **24*(1)**, 100-111.
https://doi.org/10.35333/jrp.2020.115

Popa, E.G., Gomes, M.E. and Reis, R.L. 2011. Cell delivery systems using alginate–carrageenan hydrogel beads and fibers for regenerative medicine applications. *Biomacromolecules*, ***12*(11)**, 3952-3961.
https://doi.org/10.1021/bm200965x

Rasool, B.K.A. and Fahmy, S. 2013. Development of coated beads for oral controlled delivery of cefaclor: In vitro evaluation. *Acta Pharmaceutica*, ***63*(1)**, 31-44.
https://doi.org/10.2478/acph-2013-0003

Schott, H. 1992. Kinetics of swelling of polymers and their gels. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **81**, 5, 467-470.

Semerci, B. 2019. Biyobozunur Polimer/Polisakkarit Kompozitleri İle Sefaklor Salımı, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 127.

Singh, S., Raut, S. Y., Kohli, K., & Kumar, S. 2022. Design and development of montmorillonite-sodium alginate microbeads for oral sustained delivery of cefaclor. *Journal of Medical Pharmaceutical and Allied Science*, 11 (3), 2634, 4986-4994. https://doi.org/10.55522/jmpas.V11I3.2634

Sun, S.B., Liu, P., Shao, F.M. and Miao, Q.L. 2015. Formulation and evaluation of PLGA nanoparticles loaded capecitabine for prostate cancer. *International journal of clinical and experimental medicine*, ***8*(10)**, 19670.

Torres, L.G., Velasquez, A. and Brito-Arias, M.A. 2011. Ca-alginate spheres behavior in presence of some solvents and water-solvent mixtures. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, ***2***, 8-12 https://doi.org/10.4236/abb.2011.210028-12

Xiao, C., Liu, H., Lu, Y. and Zhang, L.J*,* 2007. Blend films from sodium alginate and gelatin solutions. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry* A, **38(3)**, 317-328.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367 **DOI: https://doi.org/ 10.35414/akufemubid.1565249**
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041301 (757-766) AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041301 (757-766)

Sonlu Kanonik Hipergrupların SS-Tümlenmiş Althipergrupları Üzerine

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.10.2024
Kabul/Accepted: 19.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

On SS-Supplemented Subhypergroups of Finite Canonical Hypergroups

Sena Cam[1], Burcu Nişancı Türkmen[2*], Yıldız Aydın[3]

[1] Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı, Amasya, Türkiye
[2] Amasya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, İpekköy Kampüsü, Amasya, Türkiye*
[3] İstanbul Gelişim Üniversitesi, İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, İstanbul, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz
Bu çalışmada literatürde var olan sonlu grupların SS-tümlenmiş altgrupları kavramı, sonlu kanonik hipergruplarda yorumlanmıştır. SS-tümlenmiş her althipergrubun althipergrubunda da ss-tümlenmiş olduğu görülmüştür. Hiperyapılarda çarpıcı bir sonuç olarak SS-tümlenmiş bir hipergrubun her bölüm hipergrubunun ve güçlü normal althipergrubunun da SS-tümlenmiş olduğu ispatlanmıştır. Hipercebirsel yapı özelliklerinin çözülebilir hipergruplarda korunduğu görülmüştür. Böylece SS-tümleyen althipergruba sahip olma özelliği çözülebilir hipergruplarda karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler *Sonlu Kanonik Hipergrup, Güçlü Normal Althipergrup, Çözülebilir Althipergrup, SS-Tümlenmiş Althipergrup*

Abstract
In this study, the concept of SS-supplemented subgroups of finite groups existing in the literature has been interpreted in finite canonical hypergroups. It has been observed that every SS-supplemented subhypergroup is also SS-supplemented in its subhypergroup. As a striking result in hyperstructures, it has been proven that every factor hypergroup and strong normal subhypergroup of an SS-supplemented hypergroup is SS-supplemented. It has been observed that hyperalgebraic structure properties are preserved in solvable hypergroups. Thus, the property of having an SS-supplemented subhypergroup has been characterized in solvable hypergroups.

Keywords *Finite Canonical Hypergroup, Strong Normal Subhypergroup, Solvable Hypergroup, SS-Supplemented Subhypergroup*

1. Giriş

Matematikte Sylow teoremleri sonlu gruplar teorisinin temelini oluşturmaktadır. Sonlu bir G grubunun H altgrubu verilsin. $G = HK$ ve $H \cap K = \{e\}$ koşullarını sağlayan bir K altgrubu varsa H a G de tamlanmış altgrup adı verilir. Bu durumda K ye H nin G deki *tamlayanı* adı verilir. Hall (1937) de sonlu bir grubun çözülebilir olması için gerek ve yeter koşulun bu grubun her bir Sylow altgrubunun tamlanmış olması olduğu ispatlanmıştır. Hall (1937) de her altgrubu tamlanmış olan grupları karakterize etmiştir. Ayrıca bu grupların elementer abel Sylow altgruplu süper çözülebilir gruplar oldukları gösterilmiştir. Sonlu grupların tamlanmış altgruplarını güçlendirerek sonlu gruplarda $C-$tümlenmiş altgrup kavramı Ballester vd. (2000) de çalışılmıştır. Sonlu bir G grubunun H altgrubu için $G = HK$ ve $H \cap K \leq Core_G(H)$ olan bir $K \leq G$ mevcutsa H ye G de $C-$*tümlenmiş altgrup* adı verilir. Burada $H_G = Core_G(H) = \bigcap_{a \in A} a^{-1}Ha$ dır. G sonlu bir grup olsun. G nin mertebesi olan $|G|$ yi bölen tüm asalların kümesi $\pi(G)$ ile gösterilmektedir. $|G|_p$ ise G nin mertebesini bölen p asalının en yüksek kuvvetini göstermektedir. G_p ise $p \in \pi(G)$ olan G nin Sylow $p-$ altgrubudur. G grubunun asal mertebeli olan altgrubuna minimal altgrup denir. G sonlu grubunun H altgrubu verilsin. Eğer H, G nin her Sylow altgrubu ile permüte edilebiliyorsa yani G nin her bir P Sylow altgrubu için $HP = PH$ ise H ye G de $S-$ permüte edilebilir denir Kegel (1962). G sonlu grubunun H altgrubu için $G = HK$ ve $H \cap K$; K de $S-$quasinormal olacak şekilde bir $H \leq G$ varsa H ye G nin $SS-$*tümlenmiş altgrubu* denir. Bu takdirde K ye H *nin* G *deki* $SS-$*tümleyeni* adı verilir. Burada $H \cap K$ nın K de $S-$quasinormal olması K nın her P Sylow altgrubu için $(H \cap K)P = P(H \cap K)$ olmasıdır. Li vd. (2008) in bir genelleştirmesi olarak sonlu bir G grubunun H altgrubu için $G = HK$ ve H, K nın her Sylow altgrubu ile permüte edilebiliyorsa H a G de $S-$*quasinormal* adı verilir Guo ve Lu (2012).

Marty (1934) de cebirsel fonksiyon ve kesir cismi başta olmak üzere gruplarla ilgili bazı problemlerin çözüm yöntemlerini araştırırken grup kavramından daha genel

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Burcu Nişancı Türkmen e-posta/ e-mail: burcu.turkmen@amasya.edu.tr

olan hipergrup kavramını tanımlamıştır. Bu kavram Corsini (1993), Corsini ve Leoreanu (2003), Davvaz ve Leoreanu Fotea (2007), Vougiouklis (1994) kaynaklarında detaylı bir biçimde çalışılmıştır. H boştan farklı bir küme ve $P^*(H)$, H nin boştan farklı alt kümelerinin bir ailesi olsun. $\cdot : H \times H \to P^*(H)$, her $(a,b) \in H \times H$ için $\cdot(a,b) = a \cdot b$ biçiminde tanımlı dönüşümüne bir hiperişlem denir. $\emptyset \neq V, W \subseteq H$ için

$$V \cdot W = \bigcup \{vw \mid v \in V, w \in W\}$$

biçiminde tanımlıdır. Kısalık açısından $\{w\} \cdot V$ veya $V \cdot \{w\}$ sırasıyla $w \cdot V$ veya $V \cdot w$ biçiminde yazılacaktır. Her $a,b,c \in H$ için $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ olan $(H, \cdot)$ *yarı hipergrup* olarak adlandırılır. $(H, \cdot)$ bir yarı hipergrup olsun. Her $a \in H$ için $a \cdot H = H = H \cdot a$ ise H ye *hipergrup* adı verilir. H hipergrubunun boştan farklı K alt kümesi verilsin. K, H daki hiperişlemine göre bizzat bir hipergrup ise K ye H *nin althipergrubu* adı verilir ve $K \leq H$ ile gösterilir. $(H, \cdot)$ hipergrubunda her bir $x \in H$ için $x \in (x \cdot e_r)$ $(x \in (e_l \cdot x))$ koşulunu sağlayan e_r (e_l) elemanı mevcutsa bu elemana H nin *sağ birim (sol birim) elemanı* denir. $(H, \cdot)$ hipergrubunda her bir $x \in H$ elemanı verildiğinde $x \in (x \cdot e) \cap (e \cdot x)$ olan $e \in H$ elemanı mevcutsa bu elemana H nin *birim elemanı* adı verilir. $(H, \cdot)$ hipergrubunda her bir $x \in H$ elemanı için $x = (x \cdot e_r)(x = (e_l \cdot x))$ olan e_r (e_l) elemanına H nin *skalar sağ birimi (skalar sol birimi)* denir. Her $x \in H$ için $x = (x \cdot e) = (e \cdot x)$ eşitliğini sağlayan $e \in H$ varsa buna H hipergrubunun *skalar birimi* denir. $(H, \cdot)$ hipergrubunda $a \in H$ için $e_r \in (a \cdot a')(e_l \in (a' \cdot a))$ olan a' elemanına a nın *sağ (sol) ters elemanı* denir. $e \in (a' \cdot a) \cap (a \cdot a')$ ise $a' \in H$, a *nın tersi* olarak adlandırılır Jantani vd.(2017). Skalar birim elemana sahip, her elemanının tek ters elemanı bulunan, değişmeli olan ve $x \in (y \cdot z)$ olan her $x,y,z \in H$ için $y \in (x \cdot z^{-1})$ ve $z \in (y^{-1} \cdot x)$ koşullarını sağlayan $(H, \cdot)$ ikilisine *kanonik hipergrup* denir. $(H, \cdot)$ kanonik hipergrup T de H nin kanonik althipergrubu olsun. $\frac{H}{T} = \{x \cdot T \mid x \in H\}$ kümesi her $x \cdot T,\ y \cdot T \in \frac{H}{T}$ için $(x \cdot T) \cdot (y \cdot T) = \{t \cdot T \mid t \in x \cdot y\}$ işlemine göre hipergrup olup bu hipergruba H *nin* T *ye göre bölüm hipergrubu* adı verilir. $(H, \cdot)$ ve $(H', \circ)$ birer hipergrup olsun. Her $a,b \in H$ için $f(a,b) \subseteq f(a) \circ f(b)$ olan $f : H \to H'$ fonksiyonuna *homomorfizma* denir. Burada $f(a \cdot b) = f(a) \circ f(b)$ eşitliği sağlanıyorsa f ye *güçlü homomorfizma* adı verilir. Jantani vd. (2017) da p −Sylow althipergrup kavramını tanımlamışlardır. Yine Jantani vd. (2017) de hipergruplar için bir elemanın mertebesi tanımı şu şekilde sunulmuştur: $x_{l,p}(H)$ ile H hipergrubundaki sol mertebeleri p asalının kuvveti olan tüm elemanlarının kümesi gösterilsin. Burada her $x \in H$ elemanının *sol mertebesi*

$$0_l(x) = min\{0_l(x,x'') | e_l \in x'' \cdot x\}$$
$$= \min\{\min\{s > 0 \mid \exists k,m \in \mathbb{N} : e_l \in x^s (x''^m . x^m)^k \cap (x''^m \cdot x^m)^k \cdot x^s \mid e_p \in x'' \cdot x\}$$

biçiminde tanımlanır. H nin $x_{l,p}(H)$ ın alt kümesi olan her althipergrubuna *sol genelleştirilmiş* $p-$*althipergrubu* denir. Kısaca $lgp-$ althipergrup olarak gösterilir. H nin tüm $lgp-$althipergruplarının kümesi $M_{l,g,p}(H)$ ile gösterilir. $M_{l,g,p}(H)$ nin maksimal elemanlarına H nin *sol genelleştirilmiş* $p-Sylow$ *althipergrupları* veya kısaca $lgp-$*Sylow althipergrupları* denir. H nin $lgp-$ althipergruplarının mertebesi p nin kuvveti olup H nin mertebesini bölerse bu althipergruplara H nin *sol* $p-$*althipergrubu* veya $lp-$*althipergrubu* denir. H nin tüm $lgp-$Sylow althipergruplarının kümesi $S_{l,g,p}(H)$ ile gösterilir. $M_{l,p}(H)$ ile H nin tüm $lp-$ althipergruplarının kümesi gösterilir. $M_{l,p}(H)$ nin maksimal elemanlarına H nin *sol* $p-Sylow$ *althipergrupları* veya $lp-Sylow$ *althipergrupları* denir. $S_{l,p}(H)$ ile H nin $lp-Sylow$ althipergruplarının kümesi gösterilir. Benzer şekilde sol yerine sağ skalar birim alınarak $x_{r,p}(H)$, $M_{r,g,p}(H)$, $S_{r,g,p}(H)$ ve $S_{r,p}(H)$tanımlanabilir. Burada $x_{r,p}(H)$ H hipergrubunda *sağ mertebeleri* p asalının kuvveti olan tüm elemanların kümesi olup $x \in H$ elemanının *sağ mertebesi*

$$0_r(x) = min\{0_r(x',x) | e_r \in x \cdot x'\}$$
$$= min\{min\{s > 0 \mid \exists k,m \in \mathbb{N} : e_r \in x^s.(x^m \cdot x'^m)^k \cap (x^m \cdot x'^m)^k \cdot x^s\} | e_r \in x \cdot x'\}$$

biçiminde tanımlanır. H nin $lgp-$ Sylow ve $rgp-$Sylow olan althipergruplarına $gp-Sylow$ *althipergrupları* denir. H nin $lp-$althipergruplarına ve $rp-$ althipergruplarına H nin $p-$*althipergrupları* denir. H nin $lp-$Sylow ve $rp-$Sylow althipergruplarına ise $p-Sylow$ *althipergrubu* denir. Vasil'ev ve Zieschang (2022) da çözülebilir hipergrup kavramı literatüre kazandırılmıştır. H nin boştan farklı F alt kümesi verildiğinde her $x,y \in F$ için $x \cdot y \subseteq F$ oluyorsa F ye H nin *kapalı alt kümesi* denir. $(H, \cdot)$ hipergrubunun D ve E, kapalı alt kümeleri verilsin. Her $d \in D$ için $E \cdot d \subseteq d \cdot E$ oluyorsa D, E *yi normaller* denir. Eğer H, H deki kapalı bir alt küme F yi normallerse F ye H de *normaldir* denir. H nin D ve E kapalı alt kümeleri verilsin. Eğer $x^{-1}Dx = E$ eşitliğini sağlayan $x \in H$ varsa D ve E ye H *de eşleniktir* denir. H nin D kapalı alt kümesi verilsin. $D \subseteq E$ olan her bir $x \in E$ için $x^{-1}Dx \subseteq D$ oluyorsa D ye E de *güçlü normal alt küme* denir. Eğer E bir hipergrup ve $D \leq E$ bir güçlü normal alt küme oluyorsa D ye E nin *güçlü normal althipergrubu* denir. H

hipergrubunun $H_0 = \{e\}$, $H_n = H$ kapalı alt kümeleri birer althipergrup ise $i \in \{1, 2, \ldots, n\}$ olan her i için H_{i-1}, H_i de güçlü normal oluyorsa ve $[H_i : H_{i-1}]$ indeksi asal oluyorsa H ye *çözülebilir hipergrup* denir Vasil'ev ve Zieschang (2022).

Okuyucu hiper gruplarla ilgili temel kavramlara Corsini (1993), Corsini ve Leoreanu (2003), Davvaz ve Leoreanu Fotea (2007) yayınlarından ulaşabilir.

2. Materyal ve Metot

Bu kısmın alt başlıklarında sonlu gruplarda SS-tümlenmiş altgrup kavramı, cebirsel özellikleri ve SS-tümlenmiş altgrupların karakterizasyonları Guo ve Lu (2012) den alınmıştır.

2.1 Sonlu Grupların SS −Tümlenmiş Altgrupları ve Özellikleri

Bu bölümde öncelikle sonlu grupların SS-tümlenmiş altgruplarının özellikleri tartışılarak birtakım önermeler verilecektir.

2.1.1. Tanım G grubunun $H \leq G$ verilsin. G nin $G = HK$, $H \cap K, K$ de S −quasinormal olan bir K altgrubu mevcutsa H ye G de SS −tümlenmiş adı verilir. Bu durumda K ya H nin G deki SS −tümleyeni denir Guo ve Lu (2012).

G nin bir C −tümlenmiş altgrubu G de SS −tümlenmiştir: H, C −tümlenmiş ise bir $K_1 \leq G$ için $G = HK_1$ ve $H \cap K_1 = H_G$ dir. G nin H_G özü G nin H tarafından içerilen en büyük normal altgrubu olduğundan $H_G \lhd G$ dir. Buradan

$$(H \cap K_1)P = (H_G)P = P(H_G) = P(H \cap K_1)$$

sağlanır. K_1, H altgrubunun SS −tümleyenidir.

H, G nin bir SS −quasinormal altgrubu ise $G = HK$ ve H, K de S −quasinormaldir. W, K nin Sylow altgrubu olsun. O zaman $HW = WH$ olduğundan modüler kuraldan $(H \cap K)W = W(H \cap K)$ olur. Bu ise $H \leq G$ de SS −tümlenmiş demektir.

Her SS −quasinormal altgrup C −tümlenmiş olmayabilir ve C −tümlenmiş altgrup da SS −quasinormal olmayabilir.

2.1.1. Örnek (1) $G = S_4$ ve $H = \langle (34) \rangle$ olsun. O zaman $G = HA_4$ ve $H \cap A_4 = \{e\}$ olduğundan G de C −tümlenmiştir. Fakat A_4 ün $P = \langle (123) \rangle$ Sylow 3 −altgrubu için $HP \neq PH$ olduğundan SS −quasinormal değildir.

(2) $P = \langle x, y \,|x^{16} = y^4 = e, x^y = x^3 \rangle$ olsun. O zaman $\Phi(P) = \langle x^2, y^2 \rangle = \langle x^2 \rangle \times \langle y^2 \rangle$ ($\langle x, y^2 \rangle$ ve $\langle x^2, y \rangle$ maksimal altgrupları ve arakesitleri $\langle x^2, y^2 \rangle$ altgrubudur). $H = \langle y^2 \rangle$, P de S −quasinormaldir. P nin bütün altgrupları ile permüte edilebilir ve dolayısıyla SS −quasinormaldir. Ancak H, P de C −tümlenmiş değildir (P nin $H \cap K \nleq H_P$ olacak şekilde bir altgrubu yoktur). Guo ve Lu (2012).

2.1.2. Örnek Örnek 2.1.1 de verilen P grubu için $G = S_4 \times P$ olsun. $H = C_2 \times P_1$, $C_2 = \langle (34) \rangle$ ve $P_1 = \langle y^2 \rangle$ ve $K = A_4 \times P$ olarak alalım. Buradan $G = S_4 \times P = HK$ ve $H \cap K \cong P_1$ izomorfizmasından $H \cap K$, K da S −quasinormaldir. Böylece H, G de SS −tümlenmiştir. Fakat H, C −tümlenmiş ya da SS −quasinormal değildir Guo ve Lu (2012).

Şimdi SS-tümlenmiş altgrupların bazı temel özelliklerini verelim.

2.1.1. Lemma G grubunun SS −tümlenmiş H, N, M, L altgrupları için aşağıdakiler gerçeklenir.

(1) $H \leq M$ ise, H, M de SS −tümlenmiştir.

(2) $N \lhd G$ ve $N \leq H$ ise o zaman $\frac{H}{N}$, $\frac{G}{N}$ de SS −tümlenmiştir.

(3) π, asalların bir kümesi olsun. Şayet H, G grubunun bir π −altgrubu ve N, G nin bir π' − alt grubu ise o zaman $\frac{HN}{N}, \frac{G}{N}$ de SS −tümlenmiştir.

(4) $H \leq \Phi(L)$ ise o zaman H, G de S −quasinormaldir Guo ve Lu (2012).

Kanıt. (1) Hipotezden $G = HK$ ve $H \cap K, K$ da S −quasinormal olan $K \leq G$ vardır. $K_1 = M \cap K$ olsun. O zaman $G = HK$ iken $M = G \cap M = (HK) \cap M = H(K \cap M) = HK_1$ olup $M = HK_1$ bulunur. Ayrıca $H \cap K_1 = H \cap M \cap K = H \cap K$ olduğundan K_1 de S −quasinormaldir. $M \cap K$ nin bir Q Sylow altgrubu için $Q(H \cap K_1) = Q(H \cap K) = (H \cap K)Q$ olduğunu gösterelim. $Q = P \cap (M \cap K)$ olacak şekilde K nin bir Sylow altgrubu P vardır ve hipotezden $(H \cap K)P = P(H \cap K)$ sağlanır. O halde;

$$Q(H \cap K_1) = QH \cap K_1 = \big(P \cap (M \cap K)\big)H \cap K_1$$

$$= (P \cap M)H \cap K_1 = PH \cap M \cap K$$

$$= M \cap (PH \cap K) = M \cap \big(P(H \cap K)\big)$$

$$= M \cap (H \cap K)P = M \cap (HP \cap K)$$

$$= (M \cap HP) \cap K = HP \cap M \cap K_1$$

$$= H(P \cap M) \cap K_1 = H(P \cap (M \cap K)) \cap K_1$$

$$= HQ \cap K_1 = (H \cap K_1)Q$$

olup H, M de SS −tümlenmiştir.

(2) $G = HK$ olduğundan $\frac{G}{N} = \frac{H}{N} \cdot \frac{KN}{N}$ sağlanır. Modüler kuraldan $\frac{H}{N} \cap \frac{KN}{N} = \frac{H \cap KN}{N} = \frac{(H \cap K)N}{N} = \frac{N(H \cap K)}{N}$ dir. Herhangi bir p asalı için K_P, K nin Sylow p −altgrubu olmak üzere $\frac{KN}{N}$ nin herhangi bir Sylow p − altgrubu $\frac{K_p N}{N}$ formundadır. Böylece $(H \cap K)K_P$, G nin bir altgrubu olduğundan

$\left(\frac{H}{N} \cap \frac{KN}{N}\right)\left(\frac{K_P N}{N}\right) = \frac{(H \cap K)K_P N}{N}$, $\frac{G}{N}$ nin bir altgrubudur. Böylece (1) den $\frac{H}{N} \cap \frac{KN}{N}$, $\frac{KN}{N}$ de S −tümlenmiştir. (Yani, $\left(\frac{H}{N} \cap \frac{KN}{N}\right)\frac{K_P N}{N} = \frac{K_P N}{N}\left(\frac{H}{N} \cap \frac{KN}{N}\right)$). Böylece $\frac{H}{N}$, $\frac{G}{N}$ de SS −tümlenmiştir.

(3) H ve N sırasıyla π −altgrup ve π' −altgrup olsun. $(|N|, |H|) = 1$ ve $N \cap H = \{e\}$ ve $N \nleq H$ olmadığından $N \leq K$ olmalıdır. Böylece Modüler kuraldan $NH \cap K = N(H \cap K)$ eşitliği elde edilir.

$$G = HK \Rightarrow G = NHK = (NH)K \ \ldots (i)$$

eşitliği sağlanır. Ayrıca K nin her Sylow altgrubu P için $(NH \cap K)P = (N(H \cap K))P = N(P(H \cap K))$ ve $N \lhd G$ olduğundan

$$N(P(H \cap K)) = P(N(H \cap K)) = P(NH \cap K) \ \ldots (ii)$$

olur. O halde $NH \cap K, G$ de S −quasinormaldir. (i) ve (ii) den NH, G de SS −tümlenmiştir. (2) gereğince $\frac{HN}{N}$, $\frac{G}{N}$ de SS −tümlenmiştir.

(4) L nin maksimal altgruplarının arakesiti olan $\Phi(L) \neq L$ nin Frattini altgrubu olup aynı zamanda L nin bütün üreteç olmayan elemanlarının kümesidir. Yani $L = \langle X, a\rangle$ iken $L = \langle X\rangle$ dir.

$$H \leq \Phi(L) \Rightarrow H \leq L \Rightarrow G = HK \Rightarrow L = L \cap G = L \cap HK$$
$$= H(L \cap K) = \langle H, L \cap K\rangle$$
$$= L \cap K \Rightarrow L \leq K \Rightarrow H \leq L \leq K$$

olduğundan $H \leq K \Rightarrow G = HK = K$ olur. Böylece $H \cap K$, K de S −quasinormal olduğundan $H \cap K = H$ ve $K = G$ olup H, G de S −quasinormaldir. □

Aşağıdaki lemmalar verilen bir G grubunun S-quasinormal altgruplarına dair bilinen sonuçlardır.

2.1.2. Lemma G grubunun $H \leq G$ altgrubu S −quasinormal iken H, G de altnormaldir. Guo ve Lu (2012).

Kanıt. Kabul edelim ki iddia doğru olmasın, yani bir G grubunda $H \leq G$ S-quasinormal iken H altnormal olmasın. Bu koşulu sağlayan grupların en küçük mertebeli olanı G grubu olsun. $N = N_G(H) = \{g^{-1}Hg \mid g \in G\}$ için $H \leq N$ ve $N \lhd G$ dir. N, G nin öz normal altgrubu iken H, N de quasinormal ve G nin minimalliğinden H, N de altnormaldir ve $N \lhd G$ olduğundan $H \lhd \cdots \lhd G$ olur. O halde $N = G = N_G(H)$ olmalıdır. M, H yi içeren bir maksimal altgrup ise $N_G(H) = G$ eşitliğinden öyle bir $N_X(M)$ için $H, N_X(M)$ de kapsanmaz. Böylece $HN_X(M) = G$ ve $MN_X(M) = G$ çelişkisi elde edilir ve ispat tamamlanır. □

2.1.3. Lemma Bir p asalı için H, G grubunun bir p −altgrubu olsun. O zaman H nin G de S −quasinormal olması için gerek ve yeter koşul $O^p(G) \leq N_G(H)$ sağlanmasıdır Guo ve Lu (2012).

Kanıt. $(\Longrightarrow)$ $H \leq G, p$ −altgrubu quasinormal olsun. O zaman G nin her P Sylow p −altgrubu için $HP = PH$ dir ve H bir p −altgrup olduğundan $HP = PH = P$ dir. $O^p(G)$ ise G nin en küçük normal p −altgrubu olduğundan H nin p −altgrup olması kullanılarak $H \subseteq O^p$ (G) bulunur. Lemma 2.1.2 den G de altnormaldir. Bundan başka bir $q \neq p$ için Q Sylow p −altgrubu ise o zaman H, S −quasinormal olduğundan $QH = HQ$ sağlanır. p', p den farklı olan asal olmak üzere p' mertebeli bir eleman (ya da altgrup) bir Q Sylow p' −altgrubu tarafından kapsanır. Böylece $g \in O^p(G) \Rightarrow < g > \leq Q$ ve Q, p' mertebeli devirli grupların çarpımı olduğundan $QH = HQ$ için $< g > H = H < g >$ olup $g \in N_G(H) = \{g \in G \mid gH = Hg\}$ bulunur.

$(\Longleftarrow)$ $N_G(H) \supseteq O^p(G)$ ise o zaman $H \subseteq O^p(G)$dır. Böylece H, G de altnormaldir ve $q \neq p$ için G nin her bir Sylow q −altgrubu tarafından normallenir. □

2.2. Bir Grubun SS −Tümlenmiş Altgruplarının Karakterizasyonları

G sonlu grubunun her altgrubu SS −tümlenmiş ise G ye SS −tümlenmiştir denir. Bu bölümde SS −tümlenmiş altgrupları kullanarak grupların çözülebilirliği incelenecek ve daha sonra SS −tümlenmiş gruplar karakterize edilecektir.

2.2.1. Lemma (Schur, Zassenhaus) G sonlu grubunun $ebob(n, m) = 1$ olmak üzere $|H| = n, [G: H] = m$ koşullarını gerçekleyen H normal altgrubu için G, mertebesi m olan altgrupları kapsar ve bunlardan herhangi ikisi birbiriyle eşleniktir Gorenstein (1968).

2.2.1. Teorem Gnin çözülebilir grup olması için gerek ve yeter koşul G nin her bir Sylow altgrubunun G de SS −tümlenmiş olmasıdır Guo ve Lu (2012).

Kanıt. Eğer G çözülebilir ise G nin bütün Sylow altgrupları G de tamlanmıştır. Böylece G de SS −tümlenmiştir.

Tersine G nin her P Sylow altgrubu G de SS −tümlenmiş olsun. Tanımdan $G = PK$ ve $P \cap K, K$ de S −quasinormal olan bir $K \leq G$ mevcuttur. Lemma 2.1.2 den $P \cap K, K$ da altnormaldir. $P \cap K, K$ nın Sylow altgrubu olduğundan hem de altnormal olmasından

$$P \cap K \lhd K_1 \lhd K_2 \lhd \cdots \lhd K$$

altnormal serisi vardır. $P \cap K$, K nin Sylow altgrubu olduğundan her bir K_i nin de Sylow altgrubudur. Özel olarak $P \cap K$, K_2 nin de Sylow altgrubudur. $P \cap K$ nin K_2 de normal altgrup olduğunu ispatlamak yeterli olacaktır. $P \cap K \lhd K_1$ ve $P \cap K, K_1$ de Sylow olduğundan $P \cap K, K_1$ in tek Sylow altgrubudur. Şimdi $P \cap K$ nın K_2 nin de tek Sylow altgrubu olduğunu ispatlayalım. Q, K_2 nin başka bir

Sylow altgrubu olsa Sylow teoreminden $Q = x^{-1}(P \cap K)x$ olacak şekilde $x \in K_2$ vardır. $x \in K_1$ ise $P \cap K \lhd K_1$ olduğundan $Q = x^{-1}(P \cap K)x = P \cap K$ eşitliği sağlanır. Böylece $Q = P \cap K$ bulunur. $x \notin K_1$ ise $P \cap K \lhd K_1$ olduğundan $x^{-1}(P \cap K)x \lhd x^{-1}K_1\, x = K_1$ bulunur.

Q da K_1 in Sylow altgrubu olduğundan ve K_1 in de tek bir tane Sylow altgrubu olduğundan $P \cap K = Q$ dur. Yani K_2 nin de tek Sylow altgrubu $P \cap K$ olur. O halde $P \cap K \lhd K_2$ dir. Seri üzerinde bu şekilde devam edilirse $P \cap K \lhd K$ olur. Buradan Schur-Zassenhaus Teoremi uygulanırsa $P \cap K \lhd K$ ve $P \cap K$ Sylow q −altgrup olduğundan $\left(|P \cap K|, \left|\frac{K}{P \cap K}\right|\right) = 1$ olup $K = (P \cap K)K_p'$ olacak şekilde K nın bir K_p' Hall altgrubu vardır. Ayrıca K_p' nin tamlayan olması kullanılarak $(P \cap K) \cap K_{p'} = P \cap K \cap K_{p'} = P \cap K_{p'} = 1$ bulunur. Buradan $G = PK = P((P \cap K)K_{p'}) = P(P \cap K)K_p' = PK_p'$ elde edilir. Böylece G nin her P Sylow altgrubu G de tamlanmış olduğundan G çözülebilir gruptur. □

Teorem 2.2.1 deki argümanlar ile aşağıdaki sonucu elde ederiz.

Bir sonlu G grubunun H altgrubunun mertebesi $|H|$ ile $[G:H]$ aralarında asal ise H altgrubuna $Hall\ altgrubu$ denir.

2.2.1. Sonuç G grubunun H Hall altgrubu verilsin. H nin tamlanmış olması ancak ve ancak H nin G de SS −tümlenmiş olmasıyla sağlanır. Guo ve Lu (2012).

Kanıt. Schur-Zassenhaus teoremi gereğince her bir Hall altgrubunun G de tamlayanı vardır ve böylece H, G de SS −tümlenmiştir.

Tersine G nin bir Hall altgrubu H, G de SS −tümlenmiş olsun. $G = HK$ ve $H \cap K, K$ de S −quasinormal olan $K \leq G$ mevcuttur. Lemma 2.1.2 den $H \cap K$, K de altnormaldir. Ayrıca $H \cap K \leq K$ dır. Böylece $H \cap K, K$ de hem altnormal ve hem de Hall altgrup olduğundan $H \cap K, K$ de normaldir.

$H \cap K \lhd K_1 \lhd K_2 \lhd \cdots \lhd K, H$ nin altnormal serisi ise $H \cap K, K_1$ de normal Hall altgruptur ve böylece K_1 de karakteristiktir. O halde $H \cap K$, K_1 de karakteristiktir ve $K_1 \lhd K_2$ olduğu için $H \cap K \lhd K_2$ olur. Bu şekilde devam edilirse $H \cap K \lhd K$ bulunur. Burada Schur-Zassenhaus Teoremi uygulanırsa $H \cap K \lhd K$ ve $H \cap K$ Sylow q −altgrubu için $\left(|H \cap K|, \left|\frac{K}{H \cap K}\right|\right) = 1$ olup $K = (H \cap K)K_p'$ olacak şekilde K nın bir K_p' Hall altgrubu vardır. Ayrıca K_p' tamlayan olduğundan $(H \cap K) \cap K_{p'} = H \cap K \cap K_{p'} = H \cap K_{p'} = 1$ olur. O halde $G = HK = H((H \cap K)K_{p'}) = H(H \cap K)K_p' = HK_p'$ olup böylece G nin her H Hall-altgrubu G de tamlanmıştır. □

2.2.2. Teorem Bir G grubunun çözülebilir olması için gerek ve yeter koşul G nin her maksimal altgrubunun G de altnormal olan bir SS −tümleyeninin olmasıdır Guo ve Lu (2012).

Kanıt. G çözülebilir grubunun $H \leq G$ maksimal altgrubu verilsin. H nin G de altnormal bir SS −tümleyeni olduğunu gösterelim. $|G|$ üzerine tümevarım uygulayalım. $|G| = 1$ ise ispat açıktır. İddia mertebesi G nin mertebesinden küçük olan gruplar için doğru olsun. Şimdi $H_G \neq \{e\}$ olsun. $H_G \lhd G$ ve dolayısıyla $H_G \lhd H$ bulunur. $|\frac{G}{H_G}| < |G|$ olduğundan $\frac{H}{H_G}$, $\frac{G}{H_G}$ nın maksimal altgrubu olup hipotezden $\frac{H}{H_G}$ nin $\frac{G}{H_G}$ de bir $\frac{K}{H_G}$ SS −tümleyeni vardır ve $\frac{K}{H_G}$, $\frac{G}{H_G}$ de altnormaldir. Yani $\frac{K}{H_G} \lhd \frac{K_1}{H_G} \lhd \cdots \lhd \frac{G}{H_G}$ altnormal serisi vardır. Bu serinin H_G ile genişlemesinden $K \lhd \cdots \lhd G$ alt normal serisi bulunur. $H_G = \{e\}$ olsun. N, G nin minimal normal altgrubu ve $N \not\leq H$ olduğundan $G = HN$ ve $H \cap N \leq H_G = \{e\}$ olup N, H nin tamlayanı ve SS −tümleyenidir. Böylece $N \lhd G$ altnormaldir.

Tersine iddianın doğru olmadığını kabul edelim ve G bu iddiayı sağlamayan en küçük mertebeli grup olsun. H, G nin maksimal altgrubu olmak üzere $G = HK$ ve $H \cap K, K$ da S-quasinormal olacak şekilde K altnormal altgrubu bulunsun. G abel olmayan basit grup ise o zaman $H \neq G$ olduğundan $K = G$ dir. Lemma 2.1.2. gereğince H, G de altnormal altgruptur. Buradan $H = \{e\}$ olmalıdır. Bu ise G nin p asal mertebeli devirli sonlu grup olması demektir. O halde G çözülebilirdir. Bu ise çelişkidir. Eğer G basit grup değilse ve $N \leq G$ minimal normal altgrup ise hipotezden iddia $\frac{G}{N}$ için gerçeklenir. G nin minimalliğinden $\frac{G}{N}$ çözülebilirdir. Bundan başka N nin, G nin tek minimal normal altgrup olduğunu ve N nin $\Phi(G)$ tarafından içerilmediğini varsayabiliriz. O zaman, bu durumda G nin $M_G = \{e\}$ olan bir M maksimalini alabiliriz. Hipotezden $K \leq G$ altnormal olmak üzere $G = MK$ ve $M \cap K, K$ da S −quasinormaldir. K, G de altnormal olduğu için Lemma 2.1.2 den $M \cap K, G$ de altnormaldir. Eğer $M \cap K \neq \{e\}$ ise o zaman $M \cap K$ tarafından içerilen G nin bir minimal altnormal altgrubu olarak L yi alabiliriz. $L \cap N \trianglelefteq L$ olduğundan ve L minimal altnormal olduğundan $L \cap N = \{e\}$ ya da $L \cap N = L$ bulunur. Böylece $L \leq N$ olur. Guo ve Lu (2012, Lemma 2.7) den N, L yi normaller. Eğer $L \cap N = \{e\}$ ise o zaman $NL = N \times L$ ve $L \leq C_G(N) = \{e\}$ bulunur. Buradan $L = \{e\}$ olur. Eğer $L \cap N = L$ yani $L \leq N$ ise o zaman $M \cap K = \{e\}$ alabiliriz. Benzer bir yolla G nin bütün minimal altnormal altgruplarının N tarafından içerildiği gösterilebilir. Her bir N_i belirli bir abel olmayan basit gruba izomorf olmak üzere $N = N_1 \times N_2 \times \ldots \times N_r$ olsun. O zaman kolayca $N_1, N_2, \ldots, N_r$ nin, G nin bütün minimal altnormal altgrupları ile çakıştığı gösterilebilir. Genelliği bozmadan $N_1 \leq K$ kabul edebiliriz. O zaman öyle bir p asalı için $p, [G:M] = |K|$ sini böler. Böylece G nin bir çözülebilir normal altgrubu mevcut olup N tek minimal normal olarak bu normal altgrup tarafından

içerildiğinden N çözülebilirdir. $\frac{G}{N}$ ve N çözülebilir olduğundan G çözülebilir olur ki bu ise çelişkidir. O halde kabulümüz yanlış olup ispat tamamlanır. □

Teorem 2.2.2 yardımıyla doğrudan aşağıdaki sonuç elde edilir.

2.2.2. Sonuç Bir G grubunun çözülebilir olması için gerek ve yeter koşul$G$ grubunun herhangi bir M maksimal altgrubu için G nin $G = MK$ ve $M \cap K \leq M_G$ olan bir K altnormal altgrubunun bulunmasıdır Guo ve Lu (2012).

Uyarı: G grubu çözülebilir olmasın. Bu takdirde G de $SS-$tümlenmiş olan çözülebilir maksimal bir altgrup bulunmayabilir. Örneğin $A_5 = \langle A_4, (1234)\rangle$ ve $A_4 \cap \langle (1234)\rangle = \{e\}$ olduğundan A_4, A_5 in $SS-$tümlenmiş altgrubuna izomorftur. A_5 çözülebilir değildir fakat A_5 in A_4 e izomorf olan altgrubu maksimal çözülebilir olma koşulunu sağlar.

G grubunun çözülebilir olması durumunda grupta çözülebilir maksimal altgrubun varlığı aşağıdaki Teoremde ispatlanmıştır.

2.2.3. Teorem Bir G grubunun çözülebilir olması için gerek ve yeter koşul G nin, G de normal olan bir K $SS-$tümleyeni bulunan bir H çözülebilir maksimal altgrubunun bulunmasıdır Guo ve Lu (2012).

Kanıt. G çözülebilir grup ise G grubunun bir H maksimal normal altgrubu vardır. Bu durumda $K = G$ için G, H nin normal $SS-$tümleyenidir.

Tersine iddianın doğru olmadığını kabul edelim. O zaman G bu iddiayı sağlamayan en küçük mertebeli grup olsun. Eğer $H_G \neq \{e\}$ ise o zaman $\frac{H}{H_G}$ $\frac{G}{H_G}$ nin bir çözülebilir maksimal altgrubudur ve $\frac{KH_G}{H_G}$, $\frac{H}{H_G}$ nin $\frac{G}{H_G}$ deki bir normal $SS-$tümleyenidir. G nin seçiminden $\frac{G}{H_G}$ çözülebilirdir ve böylece G çözülebilir gruptur, bu ise çelişkidir. O zaman $H_G = \{e\}$ olmalıdır. N, G de bir minimal normal altgrup ve $C = C_G(N) = \{g \in G \mid \forall n \in N, gn = ng\}$ olsun. Doerk ve Hawkes (1992) den dolayı N, G nin tek minimal normal altgrubudur ve $C \leq N$ dir ya da $N \cong R$ abel olmayan ve $R = C_G(N) = C$, $R \cap H = N \cap H = \{e\}$ olan G nin N ve R olmak üzere iki minimal normal altgrubu vardır. Hipotezden $H \cap K$, K de $S-$quasinormal olduğundan Lemma 2.1.2. gereği $H \cap K, K$ da ve dolayısıyla G de altnormaldir. Şimdi $H \cap K \neq \{e\}$ ve L, G nin $H \cap K$ tarafından içerilen minimal altnormal altgrubu olsun. Eğer $L \leq N$ ise o zaman $L^G = L^{NH} = L^H \leq H_G = \{e\}$ olup çelişki elde edilir. O halde $L \nleq N$ dir ve benzer şekilde $L \nleq R$ dir. Böylece $N \cap L = \{e\} = R \cap L$ olmalıdır. Diğer taraftan Guo ve Lu (2012, Lemma 2.7) gereği $NL = N \times L$ bulunur. Bu ise $L \leq C$ ve $C \leq N$ olduğundan $L \leq N$ ya da $C = R$ ile çelişir. Böylece $H \cap K = \{e\}$ olmalıdır. O halde $\frac{G}{K} \cong H$ ve K, G nin minimal normal altgrubudur. Şimdi kabul edelim ki T, H maksimal normal altgrubunun bir minimal normal altgrubu olsun. O zaman $p \in \pi(H)$ olmak üzere T elementer abel $p-$gruptur. $C_K(T)$ hem H hem de K tarafından normallendiğinden $C_K(T), H$ tarafından normallenir. Yani $H \leq N_G(C_K(T))$ dir. Gerçekten de $C_K(T) = \{k \in K \mid tk = kt, \forall t \in T\}$ ve $N_G(C_K(T)) = \{g \in G \mid gC_K(T) = C_K(T)g\}$ dir. $T \lhd H$, $K \lhd G$ olan $h \in H$ ve $t \in T$ keyfi elemanlarını alalım. $T \lhd H$ olduğu için $hth^{-1} \in T$ dir. O halde $\forall k \in C_K(T)$ için

$$k(hth^{-1}) = (hth^{-1})k \Rightarrow h^{-1}khth^{-1} = th^{-1}k$$

$$\Rightarrow h^{-1}khth^{-1} = th^{-1}k \Rightarrow h^{-1}kht = th^{-1}kh$$

eşitliği elde edilir. Böylece $\forall t \in T \, için \, h^{-1}kh, t$ ile değişmelidir. Bu takdirde $h^{-1}kh \in C_K(T) \Rightarrow hC_K(T) = C_K(T)h \Rightarrow H \leq N_G(C_K(T))$ bulunur. $C_K(T)$ hem H hem de K tarafından normallendiğinden ve $G = [K]H$ olduğundan $C_K(T)$, G tarafından normallenir yani $C_K(T) \lhd G$ dir. Üstelik $C_K(T) \leq K$ iken $C_K(T) \lhd K$ dır. K, G nin minimal normal altgrubu olduğundan $C_K(T) = K$ yada $C_K(T) = 1$ olmalıdır. Eğer $C_K(T) = K \Rightarrow \forall t \in T$ ve $\forall k \in K$ için $kt = tk \Rightarrow k \in N_G(T) \Rightarrow K \leq N_G(T) \Rightarrow T \lhd K \, ve \, T \lhd H \Rightarrow T \lhd G$

$T \leq H$ için T, G de normal olduğundan T, G nin H tarafından içerilen normal altgrubudur. En genişi H_G olduğuna göre $T \leq H_G$. Bu ise $H_G = \{e\}$ olmasıyla çelişir. O halde $C_K(T) = \{e\}$ olmalıdır. Gorenstein (1968) deki Teorem 2.2 ve Teorem 2.3 gereğince K bir $p'-$grup olup K, her $q \in \pi(K)$ asalı için bir tek Q, $T-$invaryant Sylow $q-$altgrubu içerir. Herhangi bir $h \in H$ için $(Q^h)^T = (Q^T)^h = Q^h$ olup Q, $T-$invaryant olduğundan Sylow $q-$altgrubudur ve böylece $Q = Q^h$ dır. Sonuç olarak $[Q]H = G = [K]H$ ve $K = Q$ bir $p-$gruptur. O halde G çözülebilir grup olur bu ise çelişkidir. İspat tamamlanır. □

Şimdi $SS-$tümlenmiş grupları karakterize edelim.

2.2.4. Teorem G bir grup olsun. O zaman aşağıdakiler denktir.

(1) G bir $SS-$tümlenmiş gruptur.

(2) G süper çözülebilirdir, $\frac{G}{\Phi(G)}$nin her Sylow altgrubu elementer abeldir ve $\Phi(G)$ nin her altgrubu G de $S-$quasinormaldir.

(3) $\frac{G}{\Phi(G)}$ nin her altgrubu tamlanmıştır ve $\Phi(G)$ nin her altgrubu G de $S-$quasinormaldir. Guo ve Lu (2012).

Kanıt. (1) ⇒ (2) Öncelikle, G grubunun süper çözülebilir olduğunu gösterelim. Hipotezden ve Teorem 2.2.1 den G çözülebilirdir. N, G de bir minimal normal altgrup iken p asal olmak üzere N, elementer abel $p-$gruptur. Lemma 2.1.1(2) den $\frac{G}{N}$, SS-tümlenmiştir ve böylece mertebesi G nin mertebesinden küçük olanlar için doğru

olması kullanılarak tümevarımla $\frac{G}{N}$ nin süper çözülebilir olduğu görülür. Buradan G nin süper çözülebilir olduğunu göstermek için $N=\langle x\rangle$ devirli olduğunu göstermek yeterlidir. P, G nin bir Sylow p −altgrubu ve $x \in N \cap Z(P)$ için $|x|=p$ ise $\langle x\rangle K=G$ ve $\langle x\rangle \cap K$, K da S −quasinormal olacak şekilde $K \leq G$ vardır. Burada K elementer abel olduğu için $\langle x\rangle \cap K$, K nın tüm Sylow altgrupları ile değişmelidir. $\langle x\rangle \cap K$, K nın bütün p' elemanları tarafından normallendiğinden $\langle x\rangle \cap K$, K nın p' −Sylow altgrupları ile de değişmeli olduğundan P tarafından merkezlenir ve böylece $\langle x\rangle \leq Z(P)$ olup $\langle x\rangle \cap K, G$ nin normal altgrubu olur. N minimal olduğundan $\langle x\rangle \cap K=\{e\}$ ya da $(\langle x\rangle \cap K=N) \Rightarrow N \leq K$ olmalıdır. $\langle x\rangle \cap K=\{e\}$ ise $N=\langle x\rangle$ elde edilir. $N \leq K$ ise $\langle x\rangle=\langle x\rangle \cap K \leq N$ iken $N=\langle x\rangle$ bulunur. N elementer abel p −grup yani her karakteristik altgrubu $\{e\}$ ya da N ye eşit olduğundan ve $\langle x\rangle$ karakteristik altgrubu basit olduğundan $N=\langle x\rangle$ bulunur.

Şimdi P, G nin Sylow p −altgrubu ve $H, \Phi(P)$ nin bir altgrubuiken, Lemma 2.1.1(4) gereğince H, G de S −quasinormaldir. Lemma 2.1.3 den $\Phi(P), G$ de normaldir. Lemma 2.1.1(4) deki H yerine $\Phi(P)$ alınırsa $O^P\ (G) \leq N_G\ (\Phi(P))$ olup p' mertebeli elemanlarının birleşiminin ürettiği grup $\Phi(P)$ yi normaller. $\Phi(P), P$ de normal olduğundan p mertebeli elemanları tarafından normallenir. Böylece $\Phi(P) \leq \Phi(G)$ ve buradan $\frac{G}{\Phi(G)}$ nin her Sylow altgrubu elementer abeldir. Son iddia ise Lemma 2.1.1 (4) den elde edilir.

(2)⇒(3) G süper çözülebilir olduğundan çözülebilir serinin esas bölüntüleri devirli olup Hall (1937) deki Teorem 2 gereğince tamlanmıştır.

(3)⇒(1) Kabul edelim ki $\frac{G}{\Phi(G)}$ nin her altgrubu tamlanmış ve $\Phi(G)$ nin her altgrubu G de S-quasinormal olsun. H, G nin altgrubu ise o zaman $\left(\frac{H\Phi(G)}{\Phi(G)}\right)\left(\frac{K}{\Phi(G)}\right)=\frac{G}{\Phi(G)}$ ve $\left(\frac{H\phi(G)}{\Phi(G)}\right) \cap \left(\frac{K}{\Phi(G)}\right)=\frac{(H\cap K)\Phi(G)}{\Phi(G)}=\{e\}$ olacak şekilde $\frac{G}{\Phi(G)}$ nin $\frac{K}{\Phi(G)}$ altgrubu mevcuttur. Bu eşitliklerde $HK=G$ ve $H \cap K \leq \Phi(G)$ olur. Böylece $H \cap K, G$ de S-quasinormaldir. Tanımdan H, G de SS-tümlenmiştir ve G bir SS-tümlenmiş gruptur. □

3. Bulgular

Bu kısımda sonlu gruplarda çalışılan SS− tümlenmiş altgrup kavramı sonlu kanonik hipergruplara taşınarak, hiper cebirsel yapı özelliklerini çözülebilir hipergruplar yardımıyla incelenecektir. Çalışmada hipergruplar sonlu kanonik hipergrup olacak şekilde ele alınacaktır.

3.1. Tanım H hipergrubunun K althipergrubu verilsin. $H=KT$ ve $K \cap T$, T nin tüm W Sylow althipergrupları tarafından permüte edilebiliyorsa, yani $W(K \cap T)=(K \cap T)W$ oluyorsa T ye K nın H da SS −tümleyeni ve K ya H nin SS −tümlenmiş althipergrubu denir.

3.2. Örnek Z_6 çözülebilir hipergrubunun $H=\langle\bar{2}\rangle$ althipergrubunu ele alalım. $K=\langle\bar{3}\rangle$ althipergrubu $Z_6=\langle\bar{2}\rangle+\langle\bar{3}\rangle$ eşitliğini sağlar. Z_6 nın 2 −Sylow ve $3-$ Sylow althipergrupları sırasıyla $K, \langle\bar{5}\rangle$ ve H dır.
$H \cap K=\langle\bar{0}\rangle$ olup $K+\langle\bar{0}\rangle=\langle\bar{0}\rangle+K$ ve
$\langle\bar{5}\rangle+\langle\bar{0}\rangle=\langle\bar{5}\rangle=\langle\bar{0}\rangle+\langle\bar{5}\rangle$ ve $H+\langle\bar{0}\rangle=\langle\bar{0}\rangle+H$ dır. Böylece Z_6 nın H althipergrubu $SS-$ tümlenmiştir.

3.3. Önerme H hipergrubunun $SS-$ tümlenmiş olan K althipergrubu verilsin. L, H nin $K \leq L$ olan althipergrubu ise K, L de $SS-$ tümlenmiştir.

Kanıt. Hipotez gereğince $H=KT$ ve H nin tüm W Sylow althipergrupları için $W(K \cap T)=(K \cap T)W$ eşitliği sağlanır. $K \leq L$ olduğundan $L=L \cap H=L \cap (KT)=K(L \cap T)$ eşitliği sağlanır. $L \cap T=T'$ diyelim. Böylece $L=KT'$ bulunur. $K \cap T'=K \cap (L \cap T)=K \cap T$ olduğundan K, L nin SS −tümlenmiş althipergrubudur. □

3.4. Lemma H hipergrubunun SS −tümlenmiş olan K althipergrubu verilsin. N, H nin $N \leq K$ olan güçlü normal althipergrubu ise K/N, H/N nin SS −tümlenmiş althipergrubudur.

Kanıt. K, H nin SS −tümlenmiş althipergrubu olsun. Bu takdirde $H=KT$ ve H nin tüm W Sylow althipergrupları için $W(K \cap T)=(K \cap T)W$ dir. $H=KT$ ve $N \leq K$ iken $\frac{H}{N}=\frac{K}{N}.\frac{TN}{N}$ eşitliği sağlanır. Ayrıca $\frac{K}{N} \cap \frac{TN}{N}=\frac{(K\cap T)N}{N}$ dir. H nin keyfi bir p asal sayısına karşılık gelen p −Sylow althipergrubu L_p ise ; her $l \in L$ için $\pi(l)=lu$ kuralı ile verilen $\pi: L \to \frac{LN}{N}$ güçlü kanonik homomorfizması yardımıyla $\frac{H}{N}$ nin p −Sylow althipergrubunun $\frac{L_pN}{N}$ formunda olduğu açıktır. Üstelik $\frac{L_pN}{N}.\frac{(K\cap T)N}{N}=\frac{L_p(K\cap T)N}{N}=\frac{(K\cap T)N}{N}.\frac{L_pN}{N}$ eşitliği sağlanır. Böylece $\frac{K}{N}, \frac{H}{N}$ nin SS −tümlenmiş althipergrubudur. □

3.5. Teorem H hipergrup ve K, H nin SS −tümlenmiş althipergrubu ve K, tüm elemanlarının mertebesi π asalına bölünebilen H nin π −althipergrubu olsun. N, tüm elemanlarının mertebesi π' asalına bölünebilen H nin π' −althipergrubu ise KN/N, H/N nin SS −tümlenmiş althipergrubudur.

Kanıt. Hipotez gereğince $(|N|, |K|)=1$ dir. Buradan $N \cap K=\{e\}$ olup $N \trianglelefteq K$, ayrıca $H=KT$ ve H nin tüm W Sylow althipergrupları için $W(K \cap T)=(K \cap T)W$ dir. $H=KT$ iken $H=NKT=(NK)T$ dir. Ayrıca her $W<T$ için

$$(NK \cap T)W=\big(N(K \cap T)\big)W=N(W(K \cap T))$$

ve N, H nin güçlü normal althipergrubu olduğundan

$$N\big(W(K \cap T)\big)=W\big(N(H \cap T)\big)=W(NK \cap T)$$

bulunur. Böylece NK, H nin $SS-$tümlenmiş althipergrubudur. Lemma 3.4 gereğince $\frac{NK}{N}, \frac{G}{N}$ de $SS-$tümlenmiştir. □

3.6. Sonuç H hipergrup ve K, H da $SS-$ tümlenmiş althipergrup olsun. $\Phi(L)$, H nin tüm maksimal althipergruplarının arakesiti olsun. $K \leq \Phi(L)$ ise K nın tüm W Sylow althipergrupları için $KW = WK$ dır.

Kanıt. $\Phi(L) \neq L$ ve $K \leq \Phi(L)$ iken $K \leq L$ sağlanır. Hipotez gereğince $H = KT$ ve T nin tüm W Sylow althipergrupları için $(K \cap T)W = W(K \cap T)$ dir. Buradan $L = L \cap H = L \cap KT = K(L \cap T) = \langle H, L \cap T \rangle = L \cap T$ bulunur. Böylece $L \leq K$ olup $K \leq L \leq T$ zinciri elde edilir. $K \leq T$ iken $H = KT = T$ dir. $K \cap T = K$, $T = KT = H$ daki her W Sylow althipergrubu için $KW = WK$ eşitliği sağlanır. □

3.7. Tanım H hipergrup ve $K \leq H$ althipergrup olsun. K den H ye uzanan güçlü normal althipergrupların sonlu bir zinciri mevcut ise K althipergrubuna H nin güçlü altnormal althipergrubu adı verilir.

3.8. Lemma H hipergrup ve $K \leq H$ olsun. Eğer H nin tüm W Sylow althipergrupları için $KW = WK$ ise K, H nin güçlü altnormal althipergrubudur.

Kanıt. Kabul edelim ki iddia doğru olmasın. Bu takdirde $K \leq H$ ve H nin tüm W Sylow althipergrupları için $KW = WK$ iken K güçlü altnormal olmasın. Bu koşulu sağlayan hipergrupların en küçük mertebeli olanı H hipergrubu olsun. $N = N_H(K) = \{h^{-1}Kh \,|h \in H\}$ için $K \leq N$ ve N, H nin güçlü normal althipergrubudur. Eğer N, H nin öz güçlü normal althipergrubu ise K, N deki her althipergrupla çarpımsal olarak değişmelidir. H nin minimalliği gereğince K, N de güçlü altnormal althipergrup olur. N, H nin güçlü normal althipergrubu olduğundan $K \leq \cdots \leq H$ güçlü normal althipergruplarının zinciri için $N = N_H(K) = H$ olmalıdır. Bu ise K nın H da güçlü altnormal olması ile çelişir. Kabulümüz yanlış olup istenen elde edilir. □

3.9. Lemma K, H nin güçlü altnormal althipergrubu ve T, H nin bir minimal güçlü normal althipergrubu ise $T \leq N_H(K)$ dır.

Kanıt. $K = K_r \leq \cdots \leq K_1 \leq H$ ve T, H nin minimal güçlü normal althipergrubu olsun. r üzerine tümevarım uygulayalım. $r = 1$ için K, G nin güçlü normal althipergrubu ise $N_H(K) = H$ olup $T \leq H = N_H(K)$ eşitliği sağlanır. İddia serinin uzunluğunun r den küçük olması durumunda sağlansın. T minimal güçlü normal olduğundan $T \cap K_1 = \{e\}$ ya da $T \cap K_1 = T$ dir. Şayet $T \cap K_1 = \{e\}$ ise her $t \in T$ ve her $k_1 \in K_1$ için $tk_1 = k_1 t$ olup $t \in C_H(K_1)$ bulunur. Böylece $T \leq C_H(K_1)$ ve $K \leq K_1$ olduğundan $T \leq C_H(K) \leq N_H(K)$ dır. $T \cap K_1 = T$ ise $T \leq K_1$ dir. Her minimal güçlü normal althipergrup kendisini kapsayan hipergruplarda birtakım minimal güçlü normal althipergruplarının çarpımı biçiminde yazılabildiğinden $N \leq M \leq H$ koşulunu sağlayan H nin bir N minimal güçlü normal althipergrubu ve H nin bir M güçlü normal althipergrubu için N, M nin minimal normal althipergruplarının çarpımı biçiminde yazılabilir. Tümevarım kabulünden $N_i \leq N_H(K)$ olup $T = N \leq N_H(K)$ bulunur. □

3.10. Teorem H hipergrubunun çözülebilir olması için gerek ve yeter koşul H hipergrubunun her maksimal althipergrubunun H de güçlü altnormal olan bir $SS-$tümleyeninin olmasıdır.

Kanıt. H çözülebilir hipergrup ve K, H nin maksimal althipergrubu olsun. K nın H de güçlü altnormal bir $SS-$tümleyeni olduğunu göstermeliyiz. $|H|$ üzerine tümevarım uygulayalım. $|H| = 1$ ise iddianın doğruluğu açıktır. Mertebesi $|H|$ den küçük olan hipergruplar için iddia doğru olsun. $K_H \neq \{e\}$ olsun. K_H, G nin güçlü normal althipergrubu olup K_H, K da güçlü normaldir. Ayrıca $\left|\frac{H}{K_H}\right| < |H|$ için $\frac{K}{K_H}, \frac{H}{K_H}$ nın maksimal althipergrubu ve hipotezden $\frac{K}{K_H}$ nın $\frac{H}{K_H}$ nın maksimal althipergrubu ve hipotezden $\frac{K}{K_H}$ nın $\frac{H}{K_H}$ de bir $\frac{T}{K_H}$ $SS-$tümleyeni vardır ve $\frac{T}{K_H}$, $\frac{H}{K_H}$ de güçlü altnormaldir. Böylece $\frac{T}{K_H} \leq \frac{T_1}{K_H} \leq \cdots \leq \frac{H}{K_H}$ güçlü altnormal serisi vardır. Bu serinin K_H ile genişlemesinden $T \leq \cdots \leq H$ güçlü altnormal serisi bulunur. $K_H = \{e\}$ olsun. N, H nin minimal normal althipergrubu için $N \not\leq H$ iken $H = KN$, $K \cap N \leq K_H = \{e\}$ olup N, K nın tamlayanı ve $SS-$ tümleyenidir. Böylece $N \leq H$ güçlü altnormaldir.

Tersine iddianın doğru olmadığını kabul edelim ve H bu iddiayı sağlamayan en küçük mertebeli althipergrup olsun. K, H nin maksimal althipergrubu olmak üzere $H = KT$ ve T nin her W Sylow althipergrubu için $W(K \cap T) = (K \cap T)W$ olan H nin T güçlü altnormal althipergrubu bulunsun. Şayet H abel olmayan basit hipergrup ise $K \neq H$ olduğundan $T = H$ dır. Lemma 3.8 den K, H da güçlü altnormal althipergruptur. Böylece $K = \{e\}$ olmalıdır. Bu ise H nin p asal mertebeli devirli sonlu hipergrup olduğundan H çözülebilir hipergruptur. Bu ise bir çelişkidir. Şimdi H basit olmasın ve N, H nin bir minimal güçlü normal althipergrubu olsun. Hipotez gereğince iddia $\frac{H}{N}$ için doğrudur. H nin minimalliğinden $\frac{H}{N}$ çözülebilirdir. N nin H nin tek minimal güçlü normal althipergrubu olması ve N nin $\phi(H)$ da kapsanmadığından H nin $M_H = \{e\}$ olan bir M maksimal althipergrubu mevcuttur. Hipotez gereğince H nin bir T güçlü altnormal althipergrubu için $H = MT$ ve T nin her W' Sylow althipergrubu için $W'(M \cap T) = (M \cap T)W'$

dür. T, H da güçlü altnormal althipergrup olduğundan Lemma 3.8 den $M \cap T$, H de güçlü altnormaldir. Eğer $M \cap T \neq \{e\}$ ise L yi $M \cap T$ tarafından içerilen H nin bir minimal güçlü altnormal althipergrubu olarak alınabilir. $L \cap N$, L nin güçlü normal althipergrubu ve L minimal güçlü altnormal althipergrup olduğu için $L \cap N = \{e\}$ veya $L \cap N = L$ dir. Böylece $L \leq N$ bulunur. Lemma 3.9 dan N, L yi normaller. Şayet $L \cap N = \{e\}$ ise $NL = N \times L$ olup $L \leq C_H(N) = \{e\}$ bulunur. Buradan $L = \{e\}$ elde edilir. Eğer $L \leq N$ ise $M \cap T = \{e\}$ olup benzer ispat yöntemi kullanılarak H nin tüm minimal güçlü altnormal althipergruplarının N tarafından içerildiği gösterilebilir. Her biri değişmeli olmayan basit hipergruplara izomorf olan N_i ler için $N = N_1 N_2 \ldots . N_r$ olsun. Bu takdirde N_i lerin H nin tüm minimal güçlü altnormal althipergrupları ile çakıştığı görülür. Genelliği bozmadan $N_1 \leq K$ alalım. Buradan öyle bir p asalı için $p \,/\, [H:M] = |T|$ dir. Bu yüzden H nin çözülebilir güçlü normal althipergrubu vardır. N, tek minimal güçlü normal althipergrup olarak bu güçlü normal althipergrup tarafından içerildiğinden çözülebilirdir. $\frac{H}{N}$ ve N çözülebilir olduğundan Vasil'ev ve Zieschang (2022) deki Lemma 7.3 den H çözülebilir olur ki bu ise çelişkidir. O halde kabulümüz yanlış olup istenen görülür.

3.11. Sonuç Bir H hipergrubunun çözülebilir olması için gerek ve yeter koşul H nin herhangi bir M maksimal althipergrubu için H nin $H = MT$ ve $M \cap T \leq M_H$ olan bir T güçlü altnormal althipergrubunun olmasıdır. □

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, sonlu gruplarda $SS-$tümlenmiş altgrup kavramından yola çıkılarak bu kavramın Grup Teorideki önemli özelliklerine yer verilmiştir. Guo ve Lu (2012) makalesinde kanıtlanan bulgular yardımıyla $SS-$ tümlenmiş altgrupların grubun çözülebilirlik kavramıyla sınıflandırılmasında kullanıldığı gösterilmiştir. Önemli grup karakterizasyonlarını içermesi sebebiyle bulguların hipergruplara genelleştirilmesine yer verilmiştir. Sonlu Kanonik hipergrupların SS-tümlenmiş althipergruplarını tanımlanarak cebirsel özelliklerini Sylow althipergruplar yardımıyla çalışılmıştır. Ayrıca hipergrup sınıfının çözülebilir hipergruplar ile bağıntısı verilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tim etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu makale 9-12 Eylül 2024 tarihleri arasında Amasya/Türkiye'de düzenlenen 36. Ulusal Matematik Sempozyumu adlı etkinlikte sözlü bildiri olarak sunulmuş ve özeti sempozyum bildiri özet kitabında basılmış "Sonlu Kanonik Hipergrupların SS-Tümlenmiş Althipergrupları" başlıklı bildirinin tamamlanmış halidir.

Bu çalışma Prof. Dr. Burcu Nişancı Türkmen danışmanlığında ve Dr. Öğr. Üyesi Yıldız Aydın ikinci danışmanlığında 10.01.2025 tarihinde sunduğumuz "Sonlu Kanonik Hipergrupların SS-Tümlenmiş Althipergrupları" başlıklı yüksek lisans tezi esas alınarak hazırlanmıştır.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma–orijinal taslak Görselleştirme
Yazar 2: Kaynaklar, Fikir Sahibi, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme.
Yazar 3: Yazma-orijinal taslak, Görselleştirme, Biçimsel analiz

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek, birbiriyle rekabet halinde olan herhangi bir finansal çıkarlarının veya kişisel ilişkilerinin olmadığını beyan ederler.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar faydalı önerileri için hakemlere teşekkürlerini sunmaktadır.

5. Kaynaklar

Ballester Bolinches, A., Wang,Y., Xiuyun, G., 2000. C-supplemented subgroups of finite groups, *Glasgow Mathematical Journal*, **42(3)**, 383-389.

Corsini, P., 1993. Prolegomena of Hypergroup Theory. Tricesimo: Aviani Editore.

Corsini, P., Leoreanu, V., 2003. Applications of Hyperstructure Theory. *Dordrecht:* Kluwes Academical Publications.

Davvaz, B., Leoreanu Fotea, V., 2007. Hyperring Theory and Applications, International Academic Press.

Doerk, K., Hawkes, T., 1992. Finite Soluble Groups. Walter de Gruyter, Berlin.

Gorenstein, D., 1968. Finite groups. *Harper & Row, New York.*

Guo, X., Lu, J., 2012. On SS-supplemented subgroups of finite groups and their properties, *Glasgow Mathematical Journal*, **54(3)**, 481-491.

Hall, P., 1937. A characteristic property of soluble groups, *Journal of the London Mathematical Society*, **12**, 198-200.

Hall,P., 1937. *Complemented groups*, *Journal of the London Math. Soc*., **12**, 201-204.

Jantani, F., Jafarpour, M., Mousavi, S. Sh., Leoreonu, V., 2017. On order of elements in hypergroups and p-Sylow subhypergroups, *Communications in Algebra*, **45(12)**, 5092-5102.

Kegel, O., 1962. Sylow-gruppen und subnormalteiler endlicher gruppen, *Mathematische Zeitschrift*, **78(1)**, 205-221.

Li, S., Shen, Z., Liu, J., Liu, X., 2008. The influence of SS_quasinormality of some subgroups on the

structure of finite groups, *Journal of Algebra*, **319**, 4275-4287.

Marty,F., 1934. Sur une Generalization de la Nation de Groupe. 8 th Congress Mathematics Scandenaves, Stockholm, Sweden, 45-49.

Vasil'ev, A., Zieschang, P.H., 2022. Solvable hypergroups and a generalization of Hall's theorems on solvable groups to assoriation schemes, *Journal of Algebra*, **594**, 733-750.

Vougiouklis,T., 1994. Hyperstructures and Their Representations. Palm Harbor, FL: Hadronic Press.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367 **DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1577531**
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041302 (767-773) AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041302 (767-773)

On The Robust $\mathcal{D}$-Stability of The Polytope of Matrices

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 01.11.2024
Kabul/Accepted: 01.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Matrisler Politopunun Gürbüz $\mathcal{D}$-Kararlılığı Üzerine

Şerife YILMAZ*

Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Türkiye

© 2025 The Author | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract
In this study, the robust $\mathcal{D}$-stability of a matrix polytope, defined as the convex hull of a finite set of $\mathcal{D}$-stable matrices, is considered. A sufficient condition for the robust $\mathcal{D}$-stability of the matrix polytope is derived for the region $\mathcal{D} \subset \mathbb{C}$ defined as quadratic matrix inequalities (QMI). This condition is given by linear matrix inequalities (LMIs). The solution of the LMIs is addressed by optimizing the maximal eigenvalue function of symmetric matrices using convex optimization methods. Illustrative examples are provided to demonstrate the practical applications of the proposed stability condition.

Keywords: *Matrix Polytope; Robust $\mathcal{D}$-Stability; QMI Region; Linear Matrix Inequality; Convex Programming.*

Öz
Bu çalışmada, sonlu sayıda $\mathcal{D}$-kararlı matrislerin konveks zarfı şeklinde verilen bir matris politopunun gürbüz $\mathcal{D}$-kararlılığı ele alınmıştır. $\mathcal{D} \subset \mathbb{C}$ bölgesi, kuadratik matris eşitsizlikleri (KME) ile tanımlanan bir bölge olmak üzere, matrisler politopunun gürbüz $\mathcal{D}$-kararlılığı için bir yeter koşul elde edilmiştir. Bu koşul doğrusal matris eşitsizlikleri (DME) ile verilmiştir. DME'lerin çözümü konveks optimizasyon yöntemleri kullanılarak simetrik matrislerin maksimal özdeğer fonksiyonunun optimize edilmesiyle ele alınmıştır. Kararlılık koşulunun uygulamaları açıklayıcı örneklerle verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Matrisler Politopu; Gürbüz $\mathcal{D}$-Kararlılık; KME Bölgesi; Lineer Matris Eşitsizliği; Konveks Programlama.*

1. Introduction

The asymptotic stability of linear systems described by the equation $\dot{x} = Ax$ is an important concept in dynamical systems and control theory. The system's stability is determined by the location of the eigenvalues, which are the roots of the characteristic polynomial of the matrix A in the complex plane.

Let $\mathcal{D} \subset \mathbb{C}$ be a symmetric region of the complex plane to the real axis. A matrix $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ is called $\mathcal{D}$-stable if all its eigenvalues lie within the set $\mathcal{D}$ (Barmish 1994). The Hurwitz and Schur stability regions are the most well-known of these regions. If the region $\mathcal{D}$ is open left half-plane, then the matrix A is called Hurwitz stable. If the region $\mathcal{D}$ is an open unit disk, then the matrix A is called Schur stable. $\mathcal{D}$-stability problem of matrices and polynomials have been investigated in many works (see (Bhattacharyya et al. 1995, Fam and Meditch 1978, Hinrichsen and Pritchard 2005, Yedavalli 2014, Yılmaz 2022, Zaitsev 2024)).

For a matrix A to be Hurwitz stable, a necessary and sufficient condition is the existence of a positive definite matrix $P > 0$ such that the Lyapunov inequality must be satisfied:

$$A^T P + PA < 0.$$

Similarly, a matrix A is Schur stable if and only if there exists a positive definite matrix $P > 0$ such that the Stein inequality must be hold (see Khalil 2002, Yılmaz and Aksoy 2023):

$$A^T PA - P < 0.$$

The location of the eigenvalues in the complex plane of a matrix has been investigated for more specific regions $\mathcal{D}$. In Gutman (1981), a polynomial-type function has been adopted to describe the region of the complex plane in which roots are located. Necessary and sufficient conditions have been derived from the Kronecker and bialternate matrix products and positive definite matrices in Gutman (1981), Zrida and Bouazizi (2022), Chilali and Gahinet (1996).

In Zrida and Bouazizi (2022), the concept of quadratic matrix inequalities (QMI) is introduced to characterize stability regions defined by

$$\mathcal{D} = \{z \in \mathbb{C}: Q + Sz + S^T \bar{z} + Rz\bar{z} < 0\} \qquad (1)$$

where Q and R are symmetric matrices in $\mathbb{R}^{m\times m}$, with $R \geq 0$ and $S \in \mathbb{R}^{m\times m}$ (we take $R > 0$ in this paper to be

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Şerife YILMAZ e-posta/e-mail: serifeyilmaz@mehmetakif.edu.tr

able to implement the Schur complement lemma). Various convex regions in the complex plane can be represented using QMI. Important properties of QMI regions include being open, convex, and symmetrical to the real axis. Furthermore, any intersection of QMI regions is also a QMI region. The robust $\mathcal{D}$-stability of a parameter-dependent matrix family is determined using test points to assess whether LMIs are satisfied within specific intervals. This way, the matrix family's $\mathcal{D}$-stability bound can be determined reliably.

In this paper, we build on existing results to provide sufficient conditions for the robust $\mathcal{D}$-stability of matrix polytopes. Using the Schur complement lemma, we derive conditions that simplify the associated matrix inequality problem. To solve the convex optimization problem arising from these inequalities, we introduce an algorithm based on Kelley's method. The proposed conditions and algorithm are validated through illustrative examples, demonstrating their effectiveness in addressing robust $\mathcal{D}$-stability.

The paper is structured as follows. Section 2 introduces the concept of robust $\mathcal{D}$-stability for a polytope and provides the necessary background. Section 3 presents sufficient conditions for robust $\mathcal{D}$-stability of matrix polytopes using the Schur complement lemma. Section 4 describes a solution algorithm for LMIs based on convex optimization and includes numerical examples to demonstrate its application.

2. Robust $\mathcal{D}$-stability of a Polytope

A useful theorem for determining the eigenvalues of a matrix A within the set $\mathcal{D}$ (1) is given in Chilali and Gahinet (1996). This theorem provides the necessary and sufficient conditions in the form of Linear Matrix Inequalities (LMIs) for $\mathcal{D}$-stability.

In the following theorem, the Kronecker product ($\otimes$) represents an operation that combines two matrices into a structured block matrix, preserving their algebraic structure.

Theorem 1 (Chilali and Gahinet (1996)): $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ is $\mathcal{D}$-stable if and only if there exists a symmetric positive definite matrix $P > 0$ such that

$$Q \otimes P + S \otimes (AP) + S^T \otimes (PA^T) + R \otimes (APA^T) < 0. \quad (2)$$

We have provided the definition and some results concerning the $\mathcal{D}$-stability of matrices. Consider a matrix family of n-dimensional square matrices denoted by $\mathcal{A}$. If every matrix within the family $\mathcal{A}$ is $\mathcal{D}$-stable, then the family $\mathcal{A}$ is referred to as robustly $\mathcal{D}$-stable. The well-known matrix family is the polytope of matrices, and it is defined as the convex hull of two or more finite Hurwitz (Schur) matrices

$$\begin{aligned}\mathcal{A} &= \mathrm{conv}\{A_1, A_2, \dots, A_N\} \\ &= \{A(\alpha) = \textstyle\sum_{i=1}^{N} \alpha_i A_i : \alpha \in \Lambda\}\end{aligned} \quad (3)$$

where

$$\Lambda = \left\{\alpha \in \mathbb{R}^N : \sum_{i=1}^{N} \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0\right\}.$$

Edge Theorem is a recognized theorem in control theory that gives robust $\mathcal{D}$-stability of a polytope of polynomials (Bartlett et al. 1988). However, this theorem is not valid for a matrix polytopes (Barmish et al. 1988).

The robust stability of the polytope of matrices has been studied using linear matrix inequalities (LMIs) techniques (Boyd et al. 1994). A necessary condition for $\mathcal{A}$ to be robustly Hurwitz (Schur) stable is the existence of a common solution $P > 0$ that satisfies the Lyapunov (Stein) inequalities:

$$A_i^T P + P A_i < 0 \ \ (i = 1,2, \dots, N)$$

$$(A_i^T P A_i - P < 0)$$

(see Shorten and Narendra 2002, Yılmaz et al. 2014, Yılmaz et al. 2016).

The Theorem 1 regarding the robust $\mathcal{D}$-stability of the matrix polytope defined in (3) can be stated as follows.

Theorem 2: $\mathcal{A}$ (3) is robustly $\mathcal{D}$-stable if and only if there exists $P(\alpha) > 0$ such that

$$Q \otimes P(\alpha) + S \otimes \big(A(\alpha)P(\alpha)\big) + S^T \otimes \big(P(\alpha)A^T(\alpha)\big) + R \otimes \big(A(\alpha)P(\alpha)A^T(\alpha)\big) < 0 \quad (4)$$

for all $\alpha \in \Lambda$.

For the robust $\mathcal{D}$-stability of $\mathcal{A}$, the existence of positive definite matrices $P(\alpha) > 0$ for each $\alpha \in \Lambda$ is required, thus resulting in problems of infinite dimension (Geromel et al. 1998, Oliveira and Peres 2005). In Theorem 2, it is stated that if such a $P(\alpha)$ satisfies inequality (4) for all α, the conclusion follows.

However, if we can establish the existence of a common positive definite matrix $P(\alpha) = P$ that satisfies the inequality uniformly for all α, we can avoid the complexity

associated with individually determining $P(\alpha)$ for each α. This reduction is applied to the case of matrix polytopes $\mathcal{A}$, where finding a common P that satisfies the condition for $A_1, A_2, \dots, A_N$.

In this paper, we provide sufficient conditions for the robust $\mathcal{D}$-stability of the polytope of matrices $\mathcal{A}$. For this, if $P > 0$ exists for the matrix $A_1, A_2, \dots, A_N$ matrices, then this solution satisfies the matrix inequalities in Theorem 2 for all matrices in the polytope of matrices $\mathcal{A}$. We obtained this result using the Schur complement lemma. Many studies are in the literature on solving linear matrix inequalities (Polyak et al. 2021). Here, we use the Kelley method to calculate the minimum of the convex function $\phi: \mathbb{R}^r \to \mathbb{R}$, defined on the set of symmetric matrices and represented by r-dimensional vectors. When solving the minimum problem using the iterative process, the constructed algorithm effectively addresses the matrix inequalities if the ϕ function takes a negative value within the set of positive matrices.

3. Common Solution to Matrix Polytope

In this section, we give sufficient conditions for the robust $\mathcal{D}$-stability of the matrix polytope $\mathcal{A}$. To achieve this, we will linearize the expression $A(\alpha)P(\alpha)A(\alpha)^T$ on the left side of inequality (4) using Schur's complementary lemma.

Lemma 1 (Geromel 1998): Consider the following matrix

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_2^T & M_3 \end{bmatrix}$$

where $M_1 \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $M_2 \in \mathbb{R}^{n\times m}$, and $M_3 \in \mathbb{R}^{m\times m}$ with M_3 invertible. Then $M > 0$ if and only if

$M_3 > 0$ and $M_1 - M_2 M_3^{-1} M_2^T > 0$.

Lemma 2: There exists a $P > 0$ satisfying equation (2) if and only if there exists a $P > 0$ such that

$$\begin{bmatrix} -Q \otimes P - S \otimes (AP) - S^T \otimes (PA^T) & R \otimes (AP) \\ R \otimes (PA^T) & R \otimes P \end{bmatrix} > 0. \tag{5}$$

Proof: Let $M_1 = -\big(Q \otimes P + S \otimes (AP) + S^T \otimes (PA^T)\big)$, $M_2 = R \otimes (AP)$ and $M_3 = R \otimes P$. Since $P > 0$ and $R > 0$, all eigenvalues of P and R are positive (Horn and Johnson 2013, p. 438). On the other hand, the matrix $R \otimes P$ is symmetric, and its eigenvalues are the product of the eigenvalues of P and R (Bernstein 2009, p. 401). Hence, $M_3 > 0$. By utilizing the properties of the Kronecker product (see Bernstein 2009, Chapter 7), we can derive the following equations:

$$\begin{aligned} M_2 M_3^{-1} M_2^T &= [R \otimes (AP)][R \otimes P]^{-1}[R \otimes (AP)]^T \\ &= [R \otimes (AP)][R^{-1} \otimes P^{-1}][R^T \otimes (PA^T)] \\ &= [R \otimes (AP)][(R^{-1}R) \otimes (P^{-1}PA^T)] \\ &= [R \otimes (AP)][I_n \otimes A^T] \\ &= R \otimes (APA^T). \end{aligned}$$

Here, we have used the Kronecker product property

$$(\mathrm{A} \otimes \mathrm{B})(\mathrm{C} \otimes \mathrm{D}) = (\mathrm{AC}) \otimes (\mathrm{BD})$$

to simplify the expressions in the above derivation. This property allows the product of Kronecker terms to be distributed as the product of their respective matrices. Therefore,

$$\begin{aligned} M_1 - M_2 M_3^{-1} M_2^T &= -Q \otimes P - S \otimes (AP) - \\ &\quad S^T \otimes (PA^T) - R \otimes (APA^T) > 0. \end{aligned}$$

□

Theorem 3: Let the matrix polytope $\mathcal{A}$ (3) be given and $P > 0$ satisfies

$$Q \otimes P + S \otimes (A_i P) + S^T \otimes (PA_i^T) + R \otimes (A_i P A_i^T) < 0 \tag{6}$$

for $i = 1,2, \dots, N$. In that case, the inequality (6) is satisfied for all $A \in \mathcal{A}$. Consequently, the matrix polytope $\mathcal{A}$ is robustly $\mathcal{D}$-stable.

Proof: For each $i = 1,2, \dots, N$, a $P > 0$ exists such as equation (6) holds. Let $M(A) := \big[M_{ij}(A)\big]$ be a block matrix with

$$\begin{aligned} M_{11}(A) &= -[Q \otimes P + S \otimes (AP) + S^T \otimes (PA^T)], \\ M_{12}(A) &= R \otimes (AP), \\ M_{21}(A) &= R^T \otimes (PA^T), \\ M_{22}(A) &= R \otimes P. \end{aligned}$$

By Lemma 2,

$$M(A_i) = \begin{bmatrix} M_{11}(A_i) & M_{12}(A_i) \\ M_{21}(A_i) & M_{22}(A_i) \end{bmatrix} > 0, \tag{7}$$

for $i = 1,2, \dots, N$. If both sides of the inequality (7) are multiplied by α_i and summed from $i = 1 \; to \; N$

$$M(A(\alpha)) = \begin{bmatrix} M_{11}(A(\alpha)) & M_{12}(A(\alpha)) \\ M_{21}(A(\alpha)) & M_{22}(A(\alpha)) \end{bmatrix} > 0$$

where $\alpha \in \Lambda$. According to Lemma 2,

$$Q \otimes P + S \otimes \left(A(\alpha)\right) + S^T \otimes \left(PA^T(\alpha)\right) + R \otimes \left(A(\alpha)PA^T(\alpha)\right) < 0$$

is satisfied for every $\alpha \in \Lambda$, which proves that $\mathcal{A}$ is robustly $\mathcal{D}$-stable. □

We will convert the given condition into a convex minimization problem to assess a matrix polytope's robust $\mathcal{D}$-stability, utilizing the sufficient condition provided in Theorem 3.

4. A Solution Algorithm for LMIs Using a Convex Optimization Method

In this section, we present a convex optimization method for finding a positive definite matrix $P > 0$ that satisfies the inequality (6) for $\mathcal{D}$-stable matrices $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$.

The maximal and minimal eigenvalues of a symmetric matrix $S \in \mathbb{R}^{n\times n}$ are defined as follows:

$$\lambda_{\max}(S) = \max_{\|v\|=1} v^T S v, \quad \lambda_{\min}(S) = \min_{\|v\|=1} v^T S v$$

(see Horn and Johnson 2013, p. 235). If the unit eigenvector corresponding to the largest eigenvalue is $\tilde{v}$ then

$$\lambda_{\max}(S) = \tilde{v}^T S \tilde{v}$$

A similar equality holds for the minimum eigenvalue.

Let $x \in \mathbb{R}^r$ be $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_r)$ and P be an $n \times n$ symmetric matrix defined as

$$P = P(x) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_2 & x_{n+1} & \cdots & x_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & x_{2n-1} & \cdots & x_r \end{bmatrix} \tag{8}$$

with $r = n(n+1)/2$.

Denote the left-hand side of inequality (6) by

$$F(x,i) = Q \otimes P + S \otimes (A_i P) + S^T \otimes (PA_i^T) + R \otimes (A_i P A_i^T).$$

Define the functions $\phi(x)$ and $\eta(x)$ as follows:

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \max_{1\le i\le N} \lambda_{\max}(F(x,i)) \\ &= \max_{1\le i\le N, \|v\|=1} v^T F(x,i) v, \end{aligned} \tag{9}$$

$$\eta(x) = \min_{\|v\|=1} v^T P(x) v. \tag{10}$$

The functions $\phi(x)$ and $\eta(x)$ are both convex functions.

If there exists a $\tilde{x} \in \mathbb{R}^r$ such that $\phi(\tilde{x}) < 0$ and $\eta(\tilde{x}) > 0$, then the matrix $P = P(\tilde{x}) > 0$ satisfies the matrix inequality (6) for each $i = 1,2,\dots,N$. Therefore, the matrix polytope $\mathcal{A} = \text{conv}\{A_1, A_2, \cdots, A_N\}$ is robustly $\mathcal{D}$-stable.

For the positive definite matrix $P(x) > 0$, we take x from the following box:

$$\mathcal{X} = [-1,1] \times \cdots \times [-1,1] = [-1,1]^r,$$

since $\alpha > 0$ and $\alpha P(x) > 0$.

Consider the following convex minimization problem:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \phi(x) \\ \text{subject to} \quad & \eta(x) > 0, \\ & x \in \mathcal{X}. \end{aligned} \tag{11}$$

To address this convex minimization problem, Kelley's cutting plane method is utilized (see Yılmaz et al. 2014). This method reformulates problem (11) as follows:

$$\begin{aligned} & c^T z \to \min \\ & c_1(z) \ge 0, \\ & c_2(z) \ge 0, \\ & -1 \le x_i \le 1 \quad (i = 1,2,\dots,r) \end{aligned} \tag{12}$$

where $z = (x_1, x_2, \dots, x_r, L)^T$, $c = (0, \dots, 0, 1)^T$, $c_1(z) = L - \phi(x)$, and $c_2(z) = \min_{\|v\|=1} v^T P(x) v$.

Let z^0 be an initial starting point, and let $z^1, z^2, \dots, z^k$ represent subsequent iterations. In the first iteration, the cutting-plane algorithm tackles the following linear programming (LP) problem:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & L \\ \text{subject to} \quad & -h_1^T(z^0) z \ge -h_1^T(z^0) z^0 - c_1(z^0) \\ & -h_2^T(z^0) z \ge -h_2^T(z^0) z^0 - c_2(z^0) \\ & -1 \le x_i \le 1 \ (i = 1,2,\dots,r) \end{aligned} \tag{13}$$

where $h_j(z^i)$ denotes a gradient of $-c_j(z)$ at z^i $(j = 1,2)$.

Here, we have

$$h_1(z^i) = -\frac{\partial}{\partial z}(z_{r+1} - v^T F(x,i) v)|_{\substack{v=\hat{v} \\ i=\hat{\imath}}}$$

where $\hat{\imath}$ is the index that maximizes $\lambda_{\max}(F(x,i))$ and $\hat{v}$ is a corresponding unit eigenvector.

Additionally, we also have:

$$h_2(z^i) = -\frac{\partial}{\partial z}(v^T P(x)v)|_{v=\hat{v}}$$

where $\hat{v}$ is the unit vector corresponding to $\lambda_{\min}(P(x))$.

Let the point z_*^k be the minimizer of the problem defined in (13). If z_*^k satisfies the inequality

$$\min\{c_1(z_*^k), c_2(z_*^k)\} \geq -\varepsilon,$$

where $\varepsilon > 0$ is a tolerance, then z_*^k is considered an approximate solution to the problem in (13).

If this condition is not satisfied, we define j^* as the index of the most negative $c_j(z_*^k)$. To update the constraints in (13) by adding the linear constraint:

$$c_{j^*}(z^{k+1}) - h_{j^*}^T(z^{k+1})(z - z^{k+1}) \geq 0, \qquad (14)$$

and then repeat the process.

This algorithm can be adapted to our problem as follows:

Algorithm 1:

1. Select an initial point $z^0 = (x^0, L^0)^T$. Compute $\phi(x^0)$ and $c_2(z^0)$. If $\phi(x^0) < 0$ and $c_2(z^0) > 0$, complete. Otherwise, continue to the next step.
2. Find z_*^k by solving the LP problem in (13). If $c_1(z_*^k) > L^k$ and $c_2(z_*^k) > 0$, complete. Otherwise, proceed. Set $z^{k+1} = z_*^k$, update the constraints in (13) and repeat the procedure.

The stopping criteria for Algorithm 1 are implicitly defined through $c_1(z^k) > L^k$ and $c_2(z^k) > 0$. These conditions ensure that the solution satisfies the robust $\mathcal{D}$-stability criteria. Specifically:

1. When $c_1(z^k) > L^k$, by the definition $c_1(z) = L - \phi(x)$, it follows that $\phi(x^k) < 0$. This implies that the left-hand side of the matrix inequality (6) is strictly negative, confirming the $\mathcal{D}$-stability of the matrix family.
2. The condition $c_2(z^k) > 0$ ensures that the matrix $P(x^k)$ is positive definite, which is a necessary condition for stability.

Together, these criteria validate that the algorithm has reached a feasible and robustly $\mathcal{D}$-stable solution.

Example 1: Consider the region $\mathcal{D}$ (1) defined by

$$Q = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\frac{\pi}{3} & \cos\frac{\pi}{3} \\ 0 & -\cos\frac{\pi}{3} & \sin\frac{\pi}{3} \end{bmatrix}$$

(see Fig. 1). Let $\mathcal{A}$ be the convex hull of the $\mathcal{D}$-stable matrices

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.35 & -0.05 & 0.15 \\ -0.15 & -0.6 & 0.05 \\ -0.05 & -0.1 & -0.65 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.45 & 0.67 & -0.45 \\ -0.33 & -2.13 & 1.05 \\ 0.34 & -2.8 & 1.5 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.02 & -0.05 \\ 0.07 & -0.52 & 0.05 \\ 0.02 & -0.02 & -0.47 \end{bmatrix}.$$

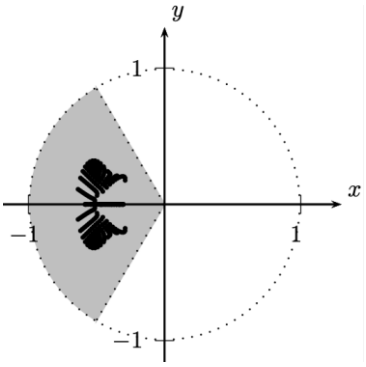


Figure 1. The region $\mathcal{D}$ and eigenvalues of the matrices within the polytope $\mathcal{A}$ in Example 1.

Let $z^0 = (x^0, L^0) = (1,0,0,1,0,1,1)^T$ be the starting point, and then apply the Algorithm 1. In this case, $c_2(z^0) = 1$, $\phi(x^0) = 9.465$ and the index $i^0 = 2$ yields this maximal eigenvalue.

Table 1. Iterative Results of Algorithm 1 for Example 1

k	L^k	$c_1(z^k)$	$c_2(z^k)$	i^k
0	1	-14.395	1	2
1	-31.731	-41.197	-2.561	2
2	-5.792	-9.450	-2.039	2
3	-1.499	-3.222	-1.834	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	-0.0026	-0.0043	0.0059	2
27	-0.0023	-0.0051	-0.0016	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	-0.0011	-0.0012	0.0028	1
33	-0.0010	-0.0009	0.0025	2

The solution of LP problem in step 33 is the point $z^{33} = (0.0673, -0.1402, -0.2445, 0.4850, 0.6453, 1, -0.0010)^T$ (see Table 1). Since $\phi(z^{33}) = -0.0001 < 0$ and $c_2(z^{33}) = 0.0025 > 0$, the matrix

$$P(z^{33}) = \begin{bmatrix} 0.0673 & -0.1402 & -0.2445 \\ -0.1402 & 0.4850 & 0.6453 \\ -0.2445 & 0.6453 & 1 \end{bmatrix}$$

satisfies the matrix inequalities (6) for $i = 1,2,3$. By Theorem 3, the family of matrices $\mathcal{A} = \text{conv}\{A_1, A_2, A_3\}$ is robustly $\mathcal{D}$-stable.

Example 2 (Zrida and Bouazizi 2022): Consider the one-parameter matrix family $A(\delta) = A_0 + \delta A_g$ for $\delta \in \mathbb{R}$, where

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}, A_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

The region $\mathcal{D}$ (1) is defined by matrices

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

It is the intersection of a horizontal strip between $+j/2$ and $-j/2$ and the open left half-plane ($j = \sqrt{-1}$).

It has been established in Zrida and Bouazizi (2022) that the one-parameter matrix $\mathrm{A}(\delta)$ is $\mathcal{D}$-stable for $\delta \in (-1, -0.7321) \cup (2.7321, \infty)$ by analzing the intervals in which the corresponding matrix function determines its eigenvalues.

In this example, we focus on the second stability interval $(2.7321, \infty)$ and demonstrate the robust $\mathcal{D}$-stablity of the matrix family within the subinterval $[2.74,4]$ using our proposed method. We consider the $\mathcal{D}$-stable matrices $\mathrm{A}_1 = \mathrm{A}(2.74)$ and $\mathrm{A}_2 = \mathrm{A}(4)$.

Starting with the initial point $z^0 = (1,0,1,1)^T$, the Algorithm 1 gives the solution after 12 steps: $z^{12} = (0.26305, -0.49103, 1, -0.00191)^T$. Since $\phi(z^{12}) = -0.00017 < 0$ and $c_2(z^{12}) = 0.0176 > 0$, the matrix

$$P(z^{12}) = \begin{bmatrix} 0.26305 & -0.49103 \\ -0.49103 & 1 \end{bmatrix}$$

satisfies the inequalities (6) for $i = 1,2$. By Theorem 3, the matrix $A(\alpha) = (1-\alpha)A_1 + \alpha A_2$ is $\mathcal{D}$-stable for all $\alpha \in [0,1]$ (see Fig. 2).

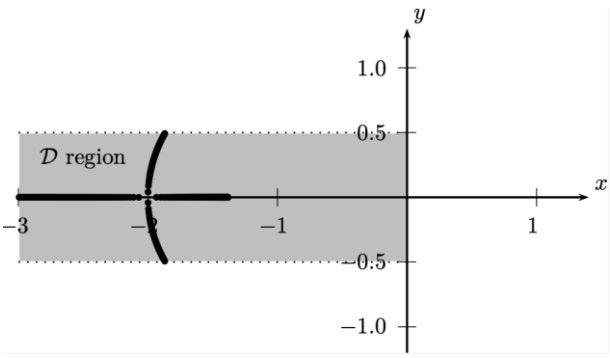


Figure 2. In Example 2, the eigenvalues of $A(\delta)$ for $\delta \in [2.74,4]$.

4. Conclusions

This paper presents sufficient conditions for robust $\mathcal{D}$-stability for matrix polytopes. We introduced a solution method utilizing the maximal eigenvalue function of symmetric matrices to solve LMIs. Through examples, the application of these stability conditions is illustrated. Future work may explore extensions to broader classes of matrix families or additional structural constraints.

Declaration of Ethical Standards
The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement
The entire research, including the formulation of the problem, development of the theoretical framework, implementation of the algorithms, and writing of the manuscript, was conducted by Şerife Yılmaz.

Declaration of Competing Interest
The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability
All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

5. References

Barmish, B.R., 1994. New Tools for Robustness of Linear Systems. Macmillan, 60-62.

Barmish, B.R., Fu, M. and Saleh, S., 1988. Stability of a polytope of matrices: counterexamples. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **33(6)**, 569–572. https://doi.org/10.1109/9.1254

Bartlett, A.C., Hollot, C.V. and Lin, H., 1988. Root locations of an entire polytope of polynomials: It suffices to check the edges. *Math. Control Signal Systems*, **1**, 61–71. https://doi.org/10.1007/BF02551236

Bhattacharyya, S., Chapellat, H. and Kee, L.H.,1995. Robust Control: the Parametric Approach. Prentice-Hall, 30-69.

Bernstein, D.S., 2009. Matrix Mathematics. Princeton University Press. Princeton, New Jersey, 399-416.

Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. and Balakrishnan V., 1994. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. *SIAM*, 7-50.

Chilali, M. and Gahinet, P., 1996. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **41(3)**, 358-367. https://doi.org/10.1109/9.486637

Fam, A.T. and Meditch, J.S, 1978. A canonical parameter space for linear systems design. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **23(3)**, 454–458. https:/doi.org/10.1109/TAC.1978.1101744

Geromel, J.C., de Oliveira, M.C. and Hsu, L., 1998. LMI characterization of structural and robust stability. *Linear Algebra and its Applications*, **285**, 69–80. https://doi.org/10.1016/S0024-3795(98)10123-4

Gutman, S. and Jury, E., 1981. A general theory for matrix root-clustering in subregions of the complex

plane. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **26(4)**, 853–863.
https://doi.org/10.1109/TAC.1981.1102764

Hinrichsen, D. and Pritchard, A.J., 2005. Mathematical Systems Theory I. Springer-Verlag, 193-368.

Horn, R.A. and Johnson, C.R., 2013. Matrix Analysis. Cambridge University Press. Cambridge, 225-515.

Khalil, H.K., 2002. Nonlinear Systems. Prentice-Hall, 111-194.

Oliveira, R.C.L.F. and Peres, P.L.D., 2005. Stability of polytopes of matrices via affine parameter-dependent Lyapunov functions: Asymptotically exact LMI conditions. *Linear Algebra and its Applications*, **405**, 209–228.
https://doi.org/10.1016/j.laa.2005.03.019

Polyak, B.T., Khlebnikov, M.V. and Shcherbakov, P.S., 2021. Linear Matrix Inequalities in Control Systems with Uncertainty. *Automation and Remote Control*, **82**, 1–40.
https://doi.org/10.1134/S000511792101001X

Shorten, R.N. and Narendra, K.S., 2002. Necessary and sufficient conditions for the existence of a common quadratic Lyapunov function for a finite number of stable second order linear time-invariant systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **6**, 709–728.
https://doi.org/10.1002/acs.719

Yedevalli, R.K., 2014. Robust Control of Uncertain Dynamic Systems: A linear state space approach. Springer, 75-100.

Yılmaz, Ş., 2022. Stable polytopes for discrete systems by using box coefficients. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, **21**, 789–804.
https://doi.org/10.1007/s00034-021-01830-6

Yılmaz, Ş. and Aksoy, B., 2023. Common solutions to Stein inequalities. *Sakarya University Journal of Science*, **27(5)**, 1097–1103.
https://doi.org/10.16984/saufenbilder.1260438

Yılmaz, Ş. and Büyükköroğlu, T., 2014. On two problems for matrix polytopes. *Applied Mathematics*, **5**, 2650–2656.
http://dx.doi.org/10.4236/am.2014.517253

Yılmaz, Ş., Büyükköroğlu, T. and Dzhafarov, V., 2016. Random search of stable member in a matrix polytope. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **308**, 59–68.
https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.05.020

Zaitsev, V., 2024. Note on Schur stability of three-dimensional interval matrices. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **34(3)**, 2304–2311.
https://doi.org/10.1002/rnc.7063

Zrida, J. and Bouazizi, M.H., 2022. Exact robust D- stability analysis for linear dynamical systems with polynomial parameter perturbation. *International Journal of Control*, **95(11)**, 2885–2899.
https://doi.org/10.1080/00207179.2021.1940301

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1569312
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041303 (774-784)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041303 (774-784)

Theory and Applications of the Double Laplace Transform for Local Derivatives with the Mittag-Leffler Kernel

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 17.10.2024
Kabul/Accepted: 27.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Mittag Leffler Çekirdeği ile Lokal Türevler için Çift Katlı Laplace Dönüşümü Teorisi ve Uygulamaları

Burak OZKUCUK*, Erdal BAS

Fırat University, Faculty of Science, Department of Mathematics, Elazığ , Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

This article aims to define the M-derivative double Laplace transform, which is the general form of the six-parameter conformable derivative involving the Mittag-Leffler function. It is expressed with several theorems and will give us a useful and dependable method for solving fractional M-derivative partial differenial equations. Furthermore, the application of these given definitions and theorems to fractional partial differential equations is shown. Finding solutions to partial differential equations containing M-derivatives that can match mathematical, engineering, and physical mode ls may be accomplished with the use of this transformation.

Keywords *M-derivative, Laplace transform, Double M-Derivative, Truncated Mittag-Leffler function.*

Öz

Bu makale, Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren altı parametreli uyumlu türevin genel formu olan M-türevi çift katlı Laplace dönüşümünü tanımlamayı amaçlamaktadır. Birkaç teoremle ifade edilir ve bize M-türevi kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanışlı ve güvenilir bir yöntem verecektir. Ayrıca, verilen bu tanım ve teoremlerin kesirli kısmi diferansiyel denklemlere uygulanması gösterilmiştir. Matematiksel, mühendislik ve fiziksel modellerle eşleşebilecek M-türevlerini içeren kısmi diferansiyel denklemlere çözümler bulmak, bu dönüşümün kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir.

Anahtar Kelimeler M-türev, Laplace dönüşümü, İki katlı M- Laplace dönüşümü, Mittag Leffler fonksiyonu

1. Introduction

One of the most significant studies conducted by humanity to better comprehend nature is described in a letter L'Hospital wrote to Leibniz in 1695 and which establishes the terms derivative and integral, the building blocks of fractional calculations. Following this letter, it caught the interest of other scientists, leading to the substantial contributions of numerous mathematicians including Euler, Lagrange, Laplace, Lacroix, Fourier, Liouville, Riemann, Greer, Holmgren, Grünwald, Letnikov, Sonin, Laurent, Nekrassov, Krug, and Weyl [Kurt 2018, Özkan and Kurt 2018]. Their contributions have helped physics, engineering, and other scientific fields advance. In recent years, there have been numerous advancements in the field of fractional calculus, as well as numerous definitions of fractional derivatives. Riemann-Liouville, Caputo, Grüwald-Letnikov, Hadamard, Marchaud, Riesz, Wely, and Erdely-Kober are a few of the authors who defined fractional derivative definitions [Kilbas 2006]. The Riemann-Liouville fractional nonlocal derivative had certain drawbacks, thus Caputo defined a new non local fractional derivative in 1967 that was superior to many other fractional non local derivatives. But since the derivative of the resultant function, product, and quotient of two functions is not defined by these non-local fractional derivative definitions, Khail and his colleagues defined the local conformable derivative [Khalil, R., Horani, M. Al., Yousef, A., Sababheh, M. 2014] and the local conformable integral [J.V.D.C Sousa, E.C. de Oliveira, 2017], which are close to the classical derivative.

Additionally, Abdeljawad developed the chain rule, exponential functions, Gronwall's inequality, partial integration, Taylor series expansion, which are some important features of the harmonic derivative, and defined the Laplace transform in terms of the harmonic derivative [Abdeljawad, T., 2015]. Another type of local derivative and integral was defined by Katugampola [Katugampola, U.N., 2011]. In 2018, Ozkan and Kurt expressed and proved certain fundamental features of the conformable Laplace transform, and then they used these properties to get the solutions of conformable fractional integral and integro-differential equations. In a different work, Ozkan and Kurt defined the double conformable Laplace transform and discussed some of its

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Burak OZKUCUK e-posta/e-mail:burakozkucukidil@gmail.com

characteristics. Using these characteristics, they were able to fully solve the conformable fractional-order heat and telegraph problem [Kurt 2018, Özkan and Kurt 2018]. Jarad F., Uğurlu E., Abdeljawad T. and Baleanu, D., investigated definitions and theorems in conformable fractional partial derivatives in 2017 [Jarad, F., Uğurlu, E., Abdeljawad, T. and Baleanu, D., 2017]. The M −derivative, a brand-new local derivative using the Mittag-Leffler function, was published in 2017 by Sousa and Oliveira [J.V.D.C Sousa, E.C. de Oliveira, 2017]. The characteristics of integer-order computations are satisfied by this newly found M-derivative. [Katugampola, U.N., 2011]. In 2020, Jarad F. and Abdeljawad T. examined the convolution theorem and Laplace transform in comformable derivatives [Jarad, F., Abdeljawad, T., 2020]. The spectrum solutions of differential equations with fractional M-derivatives under starting circumstances were studied in 2020 by Bas E. and Acay B. [Bas, E., Acay, B., 2020]. Bas, Acay, and Abdeljawad published this work to scientific resources in 2020 after obtaining the corresponding values of the M-derivative in Laplace transforms [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020].

2. Description of the truncated M-derivative and some fundamental tools

Definition 2.1. The fractional M-derivative for $0 < \beta \leq 1$ is;

$$ {}_{i}D_{M}^{\beta\varphi} g(t) = \lim_{\epsilon \to 0} \frac{g\left(t_i E_{\varphi}\left(\varepsilon t^{-\beta}\right)\right) - g(t)}{\varepsilon} \quad (1) $$

it's described as [Jarad, F., Uğurlu, E., Abdeljawad, T. and Baleanu, D., 2017].

Definition 2.2. The left M-integral of an integrable function $f, (a,t]$ with $a \geq 0, t \geq a$, and $0 < \rho \leq 1$ is defined as [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020]:

$$ {}_{M}\mathcal{I}_{a}^{\rho\gamma} f(t) = \int_a^t f(x) d_\rho(a,x) $$

$$ = \Gamma(\gamma+1) \int_a^t f(x)(x-a)^{\rho-1} dx. \quad (2) $$

where $d_\rho(x,a) = \Gamma(\gamma+1)(x-a)^{\rho-1}\, d_\rho x$ can be written, and if the M-integral from the right at the point $a = 0$ is defined as follows [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020]:

$$ {}_{M}^{\rho\gamma}\mathcal{I}_{a} f(t) = \int_a^t f(x) d_\rho(b,x) $$

$$ = \Gamma(\gamma+1) \int_a^t f(x)(b-x)^{\rho-1} dx. \quad (3) $$

Definition 2.3. Let $f, g: [a,b] \to \mathbb{R}$ and f, g differentiable functions and $0 < \rho \leq 1$. Then the partial integration of the M-derivative from the left and right respectively is as follows [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020]:

$$ \Gamma(\gamma+1) \int_a^b (t-a)^{\rho-1} f(t)\ {}_{i}D_{M}^{\rho\Upsilon} g(t) dt $$

$$ = f(t).g(t) l_a^b - \Gamma(\gamma+1) \int_a^b (t-a)^{\rho-1}\, g(\mathrm{t}) $$

$$ \mathrm{x}\ {}_{i}D_{M}^{\rho\Upsilon} f(t) dt. \quad (4) $$

and

$$ \Gamma(\gamma+1) \int_a^b (t-a)^{\rho-1} f(t)\ {}_{i}D_{M}^{\rho\Upsilon} g(t) dt = f(t) g(t) l_a^b $$

$$ + \Gamma(\gamma+1) \int_a^b (b-t)^{\rho-1}\, g(\mathrm{t})\ {}_{i}D_{M}^{\rho\Upsilon} f(t) dt. \quad (5) $$

Definition 2.4. Let $f: [a,\infty) \to \mathbb{R}$ be a real-valued function, $a \in R$, $\gamma > 0$ and $0 < \rho \leq 1$. In this case, the Laplace transform of the M-derivative of the function f is;

$$ \mathcal{L}_{\rho,\gamma}^{a}\{f(t)\}(s) = F_{\rho,\gamma}^{a}(s) $$

$$ = \Gamma(\rho+1) \int_b^\infty e^{-s\frac{\Gamma(\gamma+1)(t-a)^\rho}{\rho}} f(t)(t-a)^{\rho-1} dt \quad (6) $$

it is defined as [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad 2020].

Theorem 2.1. Let $f: [a,\infty) \to \mathbb{R}$ be a defined function. $\mathcal{L}_{\rho,\gamma}^{a}\{f(t)\}(\mathrm{s}) = \mathrm{F}_{\rho,\gamma}^{a}(\mathrm{s})$ and from the classical Laplace transform

$$ \mathcal{L}_{\rho,\gamma}^{a}\{f(t)\}(s) = F_{\rho,\gamma}^{a}(s) = \mathcal{L}\left\{ f\left(a + \left(\frac{\rho \mathrm{t}}{\Gamma(\gamma+1)} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right) \right\} \quad (7) $$

the expression is obtained by [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020].

Definition 2.4. Let the functions $f(t)$ and $g(t)$ have a piecewise continuous and exponential order, the convolution integral of the functions f and g on the M-derivative is

$$ (f * g)(t) = \Gamma(\gamma+1) $$

$$ x \int_a^t f(\tau) g\left(a + ((t-a)^\rho - (\tau-a)^\rho) \frac{1}{\rho} (t-a)^{\rho-1}\right) dt. $$

(8)

it is defined as [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020].

Theorem 2.2. $g: [a,\infty) \to \mathbb{R}$, $a \in \mathbb{R}$, $0 < \rho \leq 1$ $\Upsilon > 0$, $s > 0$ and let $f(t)$ and $g(t)$ be functions such that

$$ \mathcal{L}_{\rho,\gamma}^{a}[f(t)](s) = \mathcal{F}_{\rho,\gamma}^{a}(\mathrm{s}) \text{ and } \mathcal{L}_{\rho,\gamma}^{a}[g(t)](s) = \mathcal{G}_{\rho,\gamma}^{a}(\mathrm{s}) $$

To ensure the conditions

$$ \mathcal{L}_{\rho,\gamma}^{a}\{f * g\}(\mathrm{t}) = \mathcal{F}_{\rho,\gamma}^{a}(s).\ \mathcal{G}_{\rho,\gamma}^{a}(s), $$

the operation $\{ f * g \}$ defined by its equality, is called the convolution of functions f and g [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020].

We can express the double Laplace transformations of some functions by means of the M-derivative in the

following table [Bas, E., Acay, B., and T. Abdeljawad, 2020]:

- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\{1\}(s) = \frac{1}{s}, s > 0.$
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{(t-a)^{\rho}}{\rho}\right)^{\beta}\right\}(s) = \frac{\Gamma(\beta+1)}{s^{1+\beta}}$, $Re(\beta) > 0, s > 0.$
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\{t\}(s) = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\rho}+1\right)\left(\frac{\rho}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{1}{\rho}}}{s^{\frac{\rho+1}{\rho}}}, s > 0.$
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\{t^{k}\}(s) = \frac{\Gamma\left(\frac{k}{\rho}+1\right)\left(\frac{\rho}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{k}{\rho}}}{s^{\frac{\rho+k}{\rho}}}$, $s > 0$ and k is any constant.
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}}\right\}(s) = \frac{1}{s-c}$, $s > c$ and c is any constant.
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}}\right\}(s) = \frac{1}{(s-c)^{2}}$, c is any constant.
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{\sin(b\,\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho})\right\}(s) = \frac{b}{b^{2}+s^{2}}$, b is any constant.
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{\cos(b\,\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}\right\}(s) = \frac{s}{b^{2}+s^{2}}$, b is any constant.
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{e^{-c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}}\sin(b\;\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}\right\}(s)$ $= \frac{b}{b^{2}+(s+c)^{2}}$, b and c is any constant.
- $\mathcal{L}^{a}_{\rho,\gamma}\left\{e^{-c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}}\cos(b\,\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\rho}}{\rho}\right\}(s)$ $= \frac{s+c}{b^{2}+(s+c)^{2}}$, b and c is any constant.

3. Main Theorical Results and Applications

Definition 3.1. Let $u(x,t)$ be a piecewise continuous function on the interval $[0,\infty)\times[0,\infty)$ of exponential order. Consider for some $\gamma,\sigma > 0$ $sup_{x>0,t>0}\frac{|u(x,t)|}{e^{\frac{t^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}} < \infty$. Under these conditions M −derivative double Laplace transform is defined by

$$ {}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\{u(x,t)\} = U(p,s) $$

$$ = \int_{0}^{\infty}\int_{0}^{\infty}\Gamma(\sigma+1)e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}} $$

$$ x\,u(x,t)d_{\alpha}td_{\beta}x \tag{9} $$

where $p,s \in \mathbb{C}, 0 < \alpha,\beta \leq 1$ and the integrals are by means of conformable fractional integral with respect to t and x respectively.

Theorem 3.1. Let $u(x,t), v(x,t)$ be two functions which have the M-Derivative double Laplace transform and $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$

$$ {}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\{c_1u(x,t)+c_2v(x,t)\} $$

$$ = c_1\,{}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\{u(x,t)\} + c_2\,{}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\{v(x,t)\} \tag{10} $$

equality is ensured, that is ${}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}$ the operator is linear.

Proof. The theorem is easily proved easily by using the linearity property of the double Laplace transform with the definition of double M-Laplace.

Theorem 3.2. $u(x,t)$ is a function that provides a double M-Laplace transform, and the ${}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}$ transform, $c,d \in R$, provides the translation property as follows.

$$ {}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\left\{e^{-c\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}-d\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}}u(x,t)\right\} $$

$$ = U(p+c,s+d). $$

Proof. If the function $e^{-c\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}-d\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}}u(x,t)$ is written instead of the function $u(x,t)$ expressed in the equation (9) in the definition of the M-derivative Laplace transform,

$$ = \Gamma(\gamma+1)\,\Gamma(\sigma+1) $$

$$ x\int_{0}^{\infty}\int_{0}^{\infty}e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}}e^{-c\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}-d\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}}u(x,t)d_{\alpha}td_{\beta}x $$

$$ = \int_{0}^{\infty}\Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}-d\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}} $$

$$ X\left[\int_{0}^{\infty}\Gamma(\sigma+1)e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}-c\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}u(x,t)d_{\beta}x\right]d_{\alpha}t \tag{11} $$

is obtained. If we consider the definition of M-Laplace transform

$$ = \int_{0}^{\infty}\Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}-d\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}}[U(p+c,t)]\,d_{\alpha}t $$

$$ = U(p+c,s+d) $$

it is found, which completes the proof.

Theorem 3.3. The function $u(x,t)$ is β with respect to x. according to order and t, α. the double M −derivative Laplace transforms of the fractional partial derivatives of order, ${}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}[u(x,t)] = U(p,s)$, β and α. of the function $u(x,t)$ the double M-derivative Laplace transformations of order fractional partial derivatives are respectively

$$ (i)\ {}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\{{}_{M}D_{x}{}^{\beta}u(x,t)\} = pU(p,s) - U(0,s) \tag{10} $$

$$ (ii)\ {}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\{{}_{M}D_{t}{}^{\alpha}u(x,t)\} = sU(p,s) - U(p,0) \tag{11} $$

$$ (iii)\ {}^{M}\mathcal{L}^{\alpha\,M}_{t}\mathcal{L}^{\beta}_{x}\left\{{}_{M}D_{x}{}^{\beta}\,{}_{M}D_{t}{}^{\alpha}u(x,t)\right\} $$

$$ = psU(p,s) - pU(p,0) - s\,U(0,s) + U(0,0) \tag{12} $$

it is expressed in the form.

Proof.

(i) (9) if $u(x,t)$ is written instead of the function ${}_M{D_x}^{\beta}u(x,t)$ in the double M-Laplace transform given by the definition

$$
{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_x}^{\beta}u(x,t)\}
$$

$$
=\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}
$$

$$
\mathrm{x}\,\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}[{}_M{D_x}^{\beta}u(x,t)]d_{\beta}xd_{\alpha}t
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}
$$

$$
x\left[\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\left[{}_M{D_x}^{\beta}u(x,t)\right]d_{\beta}x\right]d_{\alpha}t
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}
$$

$$
x\left[\Gamma(\sigma+1)\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\left[{}_M{D_x}^{\beta}u(x,t)\right]d_{\beta}x\right]d_{\alpha}t
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}\left(u(x,t)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\Big|_0^{\infty}\right.
$$

$$
\left.+p\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}(u(x,t))d_{\beta}x\right)d_{\alpha}t
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}[pU(p,t)-U(0,t)]\,d_{\alpha}t
$$

$$
=p\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}\,U(p,t)d_{\alpha}t
$$

$$
-\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}\,U(0,t)d_{\alpha}t
$$

$$
=pU(p,s)-\,U(0,s)
$$

is acquired.

(ii) (9) the proof is made if ${}_M{D_t}^{\alpha}u(x,t)$ is written instead of the function $u(x,t)$ in the double M-Laplace transform given by the definition and the operations of Theorem 3.3 (i) are repeated.

(iii) (9) if the double M-Laplace transform given by the equation ${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_x}^{\beta}{}_M{D_t}^{\alpha}u(x,t)\}$ is taken instead of the function $u(x,t)$ in the definition,

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}
$$

$$
\mathrm{x}\left[\int_0^{\infty}\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}\left[{}_M{D_x}^{\beta}{}_M{D_t}^{\alpha}u(x,t)\right]d_{\alpha}t\right]d_{\beta}x
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}
$$

$$
x\left[\Gamma(\gamma+1)\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}\left[{}_M{D_x}^{\beta}{}_M{D_t}^{\alpha}u(x,t)\right]d_{\alpha}t\right]d_{\beta}x
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}
$$

$$
x\left(\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}{}_M{D_x}^{\beta}u(x,t)\Big|_0^{\infty}\right.
$$

$$
\left.+s\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}{}_M{D_x}^{\beta}\Gamma(\gamma+1)u(x,t)d_{\alpha}t\right)d_{\beta}x
$$

$$
=\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}
$$

$$
x[s\,{}_M{D_x}^{\beta}U(x,s)-{}_M{D_x}^{\beta}U(x,0)]\,d_{\beta}x
$$

$$
=s\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\left[{}_M{D_x}^{\beta}U(x,s)\right]d_{\beta}x
$$

$$
-\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\,{}_M{D_x}^{\beta}\,[U(x,0)]d_{\beta}x
$$

$$
=s\,(pU(p,s)-U(0,s))-\left(\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}U(x,0)\Big|_0^{\infty}\right.
$$

$$
\left.-\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}u(x,0)\,d_{\beta}x\right)
$$

$$
=psU(p,s)-pU(p,0)-s\,U(0,s)+U(0,0)
$$

The proof is completed.

Theorem 3.4. Let $0<\alpha,\beta\le 1$ and be $u(x,t)\in \mathcal{C}^{l}(\mathbb{R}^{+}\times\mathbb{R}^{+})$ and $l=max(m,n)$ with $m,n\in\mathbb{N}$. In addition, Let there be double M −Laplace transformations of the functions $u(x,t)$, ${}_M{D_x}^{(\mathrm{i})\beta}\,u(x,t)$ and ${}_M{D_t}^{(\mathrm{j})\alpha}\,u(x,t)$, $i=1,2,\dots,m$ and $j=1,2,\dots,n$. In this case

$$
(i)\ {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_x}^{(\mathrm{m})\beta}u(x,t)\}=p^{m}U(p,s)
$$

$$
-p^{m-1}U(0,s)-\sum_{i=1}^{m-1}p^{m-1-i}\,{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}[{}_M{D_x}^{(\mathrm{i})\beta}u(0,t)]
$$

$$
(ii)\ {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_t}^{(\mathrm{n})\alpha}u(x,t)\}=s^{n}U(p,s)
$$

$$
-s^{n-1}U(p,0)-\textstyle\sum_{j=1}^{n-1}s^{n-1-j}\,{}^{M}\mathcal{L}_x^{\beta}[{}_M{D_t}^{(\mathrm{j})\alpha}u(x,0)]
$$

$$
(iii)\ {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_x}^{(\mathrm{m})\beta}\,{}_M{D_t}^{(\mathrm{n})\alpha}\big(u(x,t)\big)\}
$$

$$
=p^{m}s^{n}(U(p,s)-s^{-1}U(p,0)-p^{-1}U(0,s)
$$

$$
-\textstyle\sum_{j=1}^{n-1}s^{-1-j}\,{}^{M}\mathcal{L}_x^{\beta}[{}_M{D_t}^{(\mathrm{j})\alpha}U(p,0)]
$$

$$
-\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}p^{-1-i}\,{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}[{}_M{D_x}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,s)]
$$

$$
+\textstyle\sum_{j=1}^{n-1}s^{-1-j}p^{-1}\left({}_M{D_t}^{(\mathrm{j})\alpha}U(0,0)\right)
$$

$$
+\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}s^{-1}\,p^{-1-i}\,{}_M{D_x}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,0)
$$

$$
+\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=1}^{n-1}s^{-1-j}p^{-1-i}\,{}_M{D_t}^{(\mathrm{j})\alpha}\,U(0,0)
$$

$$
+p^{-1}s^{-1}U(0,0))
$$

equality is ensured.

Proof.

(i) According to the total method, we must first show its accuracy for $m=1$. we proved its correctness for $m=1$ in Theorem 3.3 (i). Now we will accept its correctness for $m-1$ and show that this equality is correct for m.

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M D_x{}^{(m)\beta}u(x,t)\}$$

$$=p^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M D_x{}^{(m-1)\beta}u(x,t)\}-{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\{{}_M D_x{}^{(m-1)\beta}u(0,t)\}$$

it can be written. since equality is considered correct for $m-1$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M D_x{}^{(m)\beta}u(x,t)\}$$

$$=p(p^{m-1}U(p,s)-p^{m-2}U(0,s)$$

$$-\sum_{i=1}^{m-2}p^{m-2-i\;M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left[{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}u(0,t)\right]$$

$$-{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\{{}_M D_x{}^{(m-1)\beta}u(0,t)\}$$

$$=p^{m}U(p,s)-p^{m-1}U(0,s)$$

$$-\sum_{i=1}^{m-2}p^{m-1-i\;M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left[{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}u(0,t)\right]$$

$$-{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\{{}_M D_x{}^{(m-1)\beta}u(0,t)\}$$

$$=p^{m}U(p,s)-\;p^{m-1}U(0,s)$$

$$-\sum_{i=1}^{m-1}p^{m-1-i\;M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\{{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}u(0,t)\}$$

is obtained.

(ii) If the necessary operations are performed in a manner similar to Theorem 3.4 (i), the proof will be made.

(iii) We will use the equations (i) and (ii) to prove this theorem. (i) from equality

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M D_x{}^{(\mathrm{m})\beta}{}_M D_t{}^{(n)\alpha}(u(x,t)\}$$

$$=\;{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\{p^{m}{}_M D_t{}^{(\mathrm{n})\alpha}U(p,t)-\;p^{m-1}{}_M D_t{}^{(\mathrm{n})\alpha}U(0,t)$$

$$-\sum_{i=1}^{m-1}p^{m-1-i}({}_M D_t{}^{(\mathrm{n})\alpha}{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}u(0,t))\}$$

it can be arranged as. Due to the linearity property of the Laplace transform

$$=p^{m\;M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left\{{}_M D_t{}^{(n)\alpha}U(p,t)\right\}-p^{m-1\,M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left\{{}_M D_t{}^{(n)\alpha}U(0,t)\right\}$$

$$-{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left\{\sum_{i=1}^{m-1}p^{m-1-i}({}_M D_t{}^{(\mathrm{n})\alpha}{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}u(0,t))\right\}$$

it can be written. (ii) in accordance with the equality contained in the expression

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M D_x{}^{(m)\beta}{}_M D_t{}^{(n)\alpha}(u(x,t))\}$$

$$=p^{m}(s^{n}U(p,s)-s^{n-1}U(p,0)$$

$$-\sum_{j=1}^{n-1}s^{n-1-j}\left({}_M D_t{}^{(\mathrm{j})\alpha}U(p,0)\right))$$

$$-p^{m-1}(s^{n}U(0,s)-s^{n-1}U(0,0)$$

$$-\sum_{j=1}^{n-1}s^{n-1-j}\left({}_M D_t{}^{(\mathrm{j})\alpha}U(0,0)\right)\Bigg)$$

$$-s^{n}\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}p^{m-1-i}\left({}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,s)\right)$$

$$+s^{n-1}\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}p^{m-1-i}\left({}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,0)\right)$$

$$-\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=1}^{n-1}p^{m-1-i}s^{n-1-j}{}_M D_t{}^{(\mathrm{j})\alpha}{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,0)$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M D_x{}^{(m)\beta}{}_M D_t{}^{(\mathrm{n})\alpha}(u(x,t))\}$$

$$=p^{m}s^{n}(U(p,s)-s^{-1}U(p,0)-p^{-1}U(0,s)$$

$$-\textstyle\sum_{j=1}^{n-1}s^{-1-j\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}[{}_M D_t{}^{(\mathrm{j})\alpha}U(p,0)]$$

$$-\;\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}p^{-1-i\,M}\mathcal{L}_t^{\alpha}[{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,s)]$$

$$+\textstyle\sum_{j=1}^{n-1}s^{-1-j}p^{-1}\left({}_M D_t{}^{(\mathrm{j})\alpha}U(0,0)\right)$$

$$+\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}s^{-1}\,p^{-1-i}{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}U(0,0)$$

$$+\textstyle\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=1}^{n-1}s^{-1-j}p^{-1-i}\,{}_M D_t{}^{(\mathrm{j})\alpha}{}_M D_x{}^{(\mathrm{i})\beta}\,U(0,0)$$

$$+p^{-1}s^{-1}U(0,0))$$

the result is reached. Thus, the proof is completed

Theorem 3.5. We can express the double Laplace transformations of some functions by means of the M-derivative in the following way:

- ${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{1\}=\frac{1}{ps},\ p>0,s>0$
- ${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{x^{m}t^{n}\}=\frac{1}{ps},$ $\mathrm{x}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\left(\frac{\beta}{\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)\ \Gamma\left(1+\frac{m}{\beta}\right),$ $p>0,s>0$ m and n are any constant.

Proof.

If $u(x,t)=x^{m}t^{n}$is taken instead of the function $u(x,t)$ in the equation (8) in the definition of the fractional M-derivative Laplace transform, the double M-Laplace transform

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{x^{m}t^{n}\}=\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}$$

$$\mathrm{x}\,\Gamma(\gamma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{s}\Gamma(\gamma+1)\frac{\mathrm{t}^{\alpha}}{\alpha}}x^{m}t^{n}d_{\alpha}td_{\beta}x$$

$$=\int_0^{\infty}\Gamma(\sigma+1)\mathrm{e}^{-\mathrm{p}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}x^{m}$$

$$x\left[\int_0^\infty \Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}t^n d_\alpha t\right]d_\beta x$$

it is expressed in the form. Let's solve the integral

$I=\int_0^\infty \Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}t^n d_\alpha t$ here

if $u=\ s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}$ is transformed and written instead of in the integral

$du=\ s\Gamma(\gamma+1)\frac{\alpha t^{\alpha-\alpha}}{\alpha}d_\alpha t,\ \ \frac{du}{s}=\Gamma(\gamma+1)d_\alpha t$

$t^n=\left(\frac{u\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}$ *I, then*

$$I=\int_0^\infty \Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}t^n d_\alpha t$$

$$=\int_0^\infty e^{-u}\left(\frac{u\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\frac{du}{s}=\frac{1}{s}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\int_0^\infty e^{-u}u^{\frac{n}{\alpha}}du$$

it is obtained that, by looking at how the gamma function is defined in the $\int_0^\infty e^{-u}u^{\frac{n}{\alpha}}du$ integral

$\int_0^\infty e^{-u}u^{\frac{n}{\alpha}}du=\ \Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)$,

$=\frac{1}{s}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\int_0^\infty e^{-u}u^{\frac{n}{\alpha}}du=\frac{1}{s}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)$.

$II=\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1)e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}x^m\,d_\beta x$ let's solve the integral.

Where $v=\ p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}$ transformed and

$dv=\ p\Gamma(\sigma+1)\frac{\beta x^{\beta-\beta}}{\beta}d_\beta x,\quad \frac{dv}{p}=\Gamma(\sigma+1)d_\beta x$

If $x^m=\left(\frac{v\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}$ is written instead in the II integral,

$$II=\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1)e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}x^m\,d_\beta x$$

$$=\int_0^\infty e^{-v}\left(\frac{v\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\frac{dv}{p}=\frac{1}{p}\left(\frac{v\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\int_0^\infty e^{-v}v^{\frac{m}{\beta}}dv$$

It is discovered that, In addition, considering the definition of the gamma function $\int_0^\infty e^{-v}v^{\frac{m}{\beta}}dv$ integral

$\int_0^\infty e^{-v}v^{\frac{m}{\beta}}dv=\ \Gamma\left(1+\frac{m}{\beta}\right)$,

$=\frac{1}{p}\left(\frac{v\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\int_0^\infty e^{-v}v^{\frac{m}{\beta}}dv=\frac{1}{p}\left(\frac{v\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\ \Gamma\left(1+\frac{m}{\beta}\right)$.

$$=\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1)e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}x^m$$

$$x\left[\int_0^\infty \Gamma(\gamma+1)e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}t^n d_\alpha t\right]d_\beta x$$

$$=\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1)\,e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}x^m$$

$$x\left[\frac{1}{s}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)\right]d_\beta x$$

$$=\frac{1}{s}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1)e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}x^m d_\beta x$$

$$=\frac{1}{s}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)\frac{1}{p}\left(\frac{\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\ \Gamma\left(1+\frac{m}{\beta}\right)$$

$$=\frac{1}{ps}\left(\frac{\alpha}{s\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\frac{n}{\alpha}}\left(\frac{\beta}{p\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\frac{m}{\beta}}\Gamma\left(1+\frac{n}{\alpha}\right)\ \Gamma\left(1+\frac{m}{\beta}\right)$$

the result is reached.

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha\,{}^M\mathcal{L}_x^\beta\left\{e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}+d\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}\right\}$
  $=\frac{1}{(p-d)(s-c)}, p>c, s>d,$ c and d are any constant.
- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha\,{}^M\mathcal{L}_x^\beta\left\{\sin\left(a\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)\right.$
  $\left.x\sin\left(b\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}=\frac{ab}{(a^2+s^2)(b^2+p^2)}$, a and b are any constant.
- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha\,{}^M\mathcal{L}_x^\beta\left\{cos\left(a\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)\right.$
  $\left.x\cos\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}=\frac{ps}{(a^2+s^2)(b^2+p^2)}$, a and b are any constant.
- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha\,{}^M\mathcal{L}_x^\beta\left\{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right.$
  $\left.x\,e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}+d\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}\right\}$
  $=\frac{1}{(p-d)^2(s-c)^2}$,
  $p>c, s>d$, c and d are any constant.
- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha\,{}^M\mathcal{L}_x^\beta\left\{sinh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)\right.$
  $\left.x\,sinh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}$
  $=\frac{1}{(s^2-1)(p^2-1)}$.

Proof.

(9) instead of the function $u(x,t)$ in the double M-Laplace transform given by the definition

if $sinh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)sinh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)$ is written and

$sinh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)=\frac{e^{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}-e^{-\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}}{2}$

$ve\ sinh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)=\frac{e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}-e^{-\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}}{2}$

expansions are taken into account,

$${}^M\mathcal{L}_t^\alpha\,{}^M\mathcal{L}_x^\beta\left\{sinh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)sinh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}$$

$= \int_0^\infty \int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} \Gamma(\gamma+1)$

$x\left[sinh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right) sinh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right] e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}$

$x\, d_\alpha t d_\beta x$

$= \int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} \left[\frac{e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} - e^{-\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}}{2}\right]$

$x\left(\int_0^\infty \Gamma(\gamma+1) e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}} \left[\frac{e^{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}} - e^{-\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}}{2}\right] d_\alpha t\right)$

$x d_\beta x$

$= \int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}$

$x\left[\frac{e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} - e^{-\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}}{2}\right]\left(\frac{1}{s^2-1}\right) d_\beta x$

$= \frac{1}{s^2-1}\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} \left[\frac{e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} - e^{-\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}}{2}\right] d_\beta x$

$= \left(\frac{1}{s^2-1}\right)\left[\frac{1}{2}\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} d_\beta x\right.$

$\left. -\frac{1}{2}\int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} e^{-\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} d_\beta x\right]$

$= \left(\frac{1}{s^2-1}\right)\left[\frac{1}{2(p-1)} - \frac{1}{2(p+1)}\right] = \frac{1}{(s^2-1)(p^2-1)}.$

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{cosh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)\right.$

  $\left. x\ cosh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\} = \frac{ps}{(s^2-1)(p^2-1)}$

Proof.

(9) instead of the function $u(x,t)$ in the double M-Laplace transform given by the definition

$cosh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right) cosh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)$ is written, the proof is completed if the

$cosh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right) = \frac{e^{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}} + e^{-\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}}}{2}$

, $cosh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right) = \frac{e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} + e^{-\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}}{2}$ expansions are taken into account and similar operations are performed as in the (vii) form of the theorem.

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha} + d\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}\right.$

  $\left. x\cos\left(a\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)\cos\left(b\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}$

  $= \frac{(p-d)(s-c)}{(a^2+(s-c)^2)(b^2+(p-d)^2)}$, a,b,c and d are any constant.

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha} + d\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}\right.$

  $\left. x\sin\left(a\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)\sin\left(b\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}$

  $= \frac{ab}{(a^2+(s+c)^2)(b^2+(p+d)^2)}$, a,b,c and d are any constant.

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha} + d\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}\right.$

  $\left. x sinh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right) sinh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}$

  $= \frac{1}{((s-c)^2-1)((p-d)^2-1)}$, c and d are any constant.

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{e^{c\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha} + d\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}}\right.$

  $\left. x cosh\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right) cosh\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}\right)\right\}$

  $= \frac{(p-d)(s-c)}{((s-c)^2-1)((p-d)^2-1)}$, c and d are any constant.

- ${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)^b \left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\zeta}{\zeta}\right)^c\right\}$

  $= \frac{\Gamma(1+b)}{s^{1+b}}\frac{\Gamma(1+c)}{p^{1+c}}$,

  $Re\ (b) > 0, Re\ (c) > 0, s > 0$ and $p > 0$.

Proof.

(9) instead of the function $u(x,t)$ in the double M-Laplace transform given by the definition

$\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)^b \left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\zeta}{\zeta}\right)^c$ is written and similar operations are performed

${}^M\mathcal{L}_t^\alpha {}^M\mathcal{L}_x^\beta \left\{\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)^b \left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\zeta}{\zeta}\right)^c\right\}$

$= \int_0^\infty \int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}} \Gamma(\gamma+1)$

$x\left[\left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)^b \left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\zeta}{\zeta}\right)^c\right] d_\alpha t d_\beta x$

$= \int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} \left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\zeta}{\zeta}\right)^c$

$x\left(\int_0^\infty \Gamma(\gamma+1) e^{-s\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}} \left(\Gamma(\gamma+1)\frac{t^\alpha}{\alpha}\right)^b d_\alpha t\right) d_\beta x$

$= \frac{\Gamma(1+b)}{s^{1+b}} \int_0^\infty \Gamma(\sigma+1) e^{-p\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\beta}{\beta}} \left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^\zeta}{\zeta}\right)^c d_\beta x$

$= \frac{\Gamma(1+b)}{s^{1+b}}\ \mathcal{L}_{\beta,\sigma}^{a}\left\{\left(\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\zeta}}{\zeta}\right)^{c}\right\}$

$= \frac{\Gamma(1+b)}{s^{1+b}}\frac{\Gamma(1+c)}{p^{1+c}}$.

Definition 3.2. Let $f(x,t)$ and $g(x,t)$ be continuous functions. M-derivative double convolution in the sense of derivative

$(f ** g)(x,t)$

$= \Gamma(\gamma+1)\,\Gamma(\sigma+1)\int_0^x\int_0^t f(x-v,t-\mu)g(v,\mu)\, x d_\beta v d_\alpha \mu$

it is defined by its integral.

Theorem 3.6. (Convolutions Theorem) Let $U(x,t)$ and $v(x,t)$ functions $U(p,s) = {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{u(x,t)\}$ and $V(p,s) = {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{v(x,t)\}$ have a double M-Laplace transform for $s>0$ and $p>0$. In this case, to express the double convolutions of the functions $u(x,t) ** v(x,t)$ to

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{u(x,t) ** v(x,t)\} = U(p,s)\,V(p,s)$

is in the form.

Proof.

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{u(x,t) ** v(x,t)\}$

$= {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}[u\left(\left(\frac{\beta x}{\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\beta},\left(\frac{\alpha t}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\alpha}\right)$

$** v\left(\left(\frac{\beta x}{\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\beta},\left(\frac{\alpha t}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\alpha}\right)]$

It can be written. Since the double M-derivative Laplace transform on the right side of the above equation is known to provide the convolution property

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{u\left(\left(\frac{\beta x}{\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\beta},\left(\frac{\alpha t}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\alpha}\right)$

$** v\left(\left(\frac{\beta x}{\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\beta},\left(\frac{\alpha t}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\alpha}\right)\}$

$= {}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{u\left(\left(\frac{\beta x}{\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\beta},\left(\frac{\alpha t}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\alpha}\right)\right\}$

$x\ \mathcal{L}_t^{\alpha}\mathcal{L}_x^{\beta}\{v\left(\left(\frac{\beta x}{\Gamma(\sigma+1)}\right)^{\beta},\left(\frac{\alpha t}{\Gamma(\gamma+1)}\right)^{\alpha}\right)\}$

$= U(p,s)\,V(p,s)$,

this proves the theorem.

Applications 3.1.

${}_M{D_t}^{(2)\alpha}u(x,t) - {}_M{D_x}^{(2)\beta}u(x,t) + u(x,t)$

$+\int_0^x\int_0^t \Gamma(\sigma+1)\ \Gamma(\gamma+1)$

$x\ e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)(t-\mu)^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{(x-v)^{\beta}}{\beta}}u(v,\mu)d_\beta v d_\alpha \mu$

$= e^{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\left(1+ e^{\Gamma(\gamma+1)\frac{t^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\right)$ (13)

about to be

$u(0,t) = e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}}$

$u(x,0) = e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}$ (14)

${}_M{D_x}^{\beta}u\,(0,t) = e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}}$

${}_M{D_t}^{\alpha}u(x,0) = e^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}$

solve the M-derivative partial integro-differential equation given by the initial conditions.

Solution.

(13) if the double M-Laplace transform is applied to both sides of the M-derivative integro-differential equation given by the equation and the convolution theorem is applied

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_t}^{(2)\alpha}u(x,t)\}$

$= s^2\,U(p,s) - sU(p,0) - {}_M{D_t}^{\alpha}u(p,0)$ (15)

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_M{D_x}^{(2)\beta}u(x,t)\}$

$= p^2\,U(p,s) - pU(0,s) - {}_M{D_x}^{\beta}u(0,s)$ (16)

$\int_0^x\int_0^t \Gamma(\sigma+1)\ \Gamma(\gamma+1)e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)(t-\mu)^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{(x-v)^{\beta}}{\beta}}$

$x u(v,\mu)d_\beta v d_\alpha \mu = \frac{1}{(s-1)(p-1)}\,U(p,s)$ (17)

is acquired.

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\right\} = \frac{1}{(s-1)(p-1)}$ (18)

${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\right\}$

$= \frac{1}{(s-1)^2(p-1)^2}$ (19)

equations (15), (16), (17), (18), and (19). If the provided M-derivative Integro-differential equation is substituted with equation (13)

$s^2\,U(p,s) - sU(p,0) - {}_M{D_t}^{\alpha}u(p,0) - p^2\,U(p,s)$

$+pU(0,s) + {}_M{D_x}^{\beta}u(0,s) + U(p,s)$

$+\frac{1}{(s-1)(p-1)}\,U(p,s) = \frac{1}{(s-1)(p-1)} + \frac{1}{(s-1)^2(p-1)^2}$ (20)

the equation is found. If the double M-Laplace transform is applied to the initial conditions given by (14), then

$$U(0,s)={}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left\{e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}}\right\}=\frac{1}{(s-1)}$$

$$U(p,0)={}^{M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{\mathrm{e}^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\right\}=\frac{1}{(p-1)}$$

$${}_{M}D_t^{\alpha}u(p,0)={}^{M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{\mathrm{e}^{\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}\right\}=\frac{1}{(p-1)} \quad (21)$$

$${}_{M}D_x^{\beta}u(0,s)={}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha}\left\{e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}}\right\}=\frac{1}{(s-1)}.$$

(21) equations are written in place in equation (20) and

$$s^2\,U(p,s)-\frac{s}{(p-1)}\cdot\frac{1}{(p-1)}-p^2\,U(p,s)+\frac{p}{(s-1)}+\frac{1}{(s-1)}$$

$$+\frac{1}{(s-1)(p-1)}U(p,s)+\;U(p,s)$$

$$=\frac{1}{(s-1)(p-1)}+\frac{1}{(s-1)^2(p-1)^2}$$

if the necessary actions are taken

$$U(p,s)=\frac{1}{(s-1)(p-1)}. \quad (22)$$

is obtained. From here, similar operations to the examples given above are performed by

$$u(x,t)=e^{\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}+\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}}. \quad (23)$$

Applications 3.2.

$${}_{M}D_t^{\alpha}u(x,t)+{}_{M}D_t^{(3)\alpha}u(x,t)$$

$$-\int_0^t\Gamma(\gamma+1)sinh\left(\frac{\Gamma(\gamma+1)(t-y)^{\alpha}}{\alpha}\right){}_{M}D_x^{(3)\beta}u(x,y)d_{\alpha}y=0 \quad (24)$$

about to be

$$u(0,t)=0$$

$${}_{M}D_x^{\beta}u\,(0,t)=sin\left(\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}\right)$$

$${}_{M}D_x^{(2)\beta}u\,(0,t)=0 \quad (25)$$

$$u(x,0)=0$$

$${}_{M}D_t^{\alpha}u(x,0)=\;\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}$$

$${}_{M}D_t^{(2)\alpha}u(x,0)=0$$

solve the M-derivative partial integro-differential equation given by the initial conditions.

Solution.

If the double M-Laplace transform is applied to both sides of the M-derivative integro-differential equation given by (24), then,

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_t^{\alpha}u(x,t)\}=sU(p,s)-U(p,0) \quad (26)$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_t^{(3)\alpha}u(x,t)\}=s^3\;U(p,s)-s^2U(p,0)$$

$$-s\,{}_{M}D_t^{\alpha}u(p,0)-{}_{M}D_t^{(2)\alpha}u(p,0) \quad (27)$$

Definition 3.2**.** and Theorem 3.5 in the integral on the right side of the M-derivative integro-differential equation given by (24). If applied,

$$\int_0^t\Gamma(\gamma+1)sinh\left(\frac{\Gamma(\gamma+1)(t-y)^{\alpha}}{\alpha}\right)$$

$$x\,{}_{M}D_x^{(3)\beta}u(x,y)d_{\alpha}y$$

$$={}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{sinh\left(\frac{\Gamma(\gamma+1)(t)^{\alpha}}{\alpha}\right){}_{M}D_x^{(3)\beta}u(x,t)\right\}$$

$$={}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\left\{sinh\left(\frac{\Gamma(\gamma+1)(t)^{\alpha}}{\alpha}\right)\right\}{}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_x^{(3)\beta}u(x,t)\}$$

$$=\frac{1}{s^2-1}\left(p^3\;U(p,s)-p^2U(0,s)-p\,{}_{M}D_x^{\beta}u(0,s)\right.$$

$$\left.-{}_{M}D_x^{(2)\beta}u(0,s)\right) \quad (28)$$

is acquired. If we apply the double M-Laplace transform to the initial conditions given by (25)

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{u(0,t)\}=0$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_x^{\beta}u(0,t)\}=\frac{1}{s^2+1}$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{u(x,0)\}=0$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_x^{(2)\beta}u(0,t)\}=0 \quad (29)$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_t^{\alpha}u(x,0)\}=\frac{1}{p^2}$$

$${}^{M}\mathcal{L}_t^{\alpha\,M}\mathcal{L}_x^{\beta}\{{}_{M}D_t^{(2)\alpha}u(x,0)\}=0.$$

If (26), (27), (28) and (29) are considered in the M-derivative integro-differential equation given by their equation (24), then

$$sU(p,s)-U(p,0)+s^3\;U(p,s)-s^2U(p,0)$$

$$-s\,{}_{M}D_t^{\alpha}u(p,0)-{}_{M}D_t^{(2)\alpha}u(p,0)$$

$$-\frac{1}{s^2-1}\left(p^3\;U(p,s)-p^2U(0,s)-p\,{}_{M}D_x^{\beta}u(0,s)\right.$$

$$\left.-{}_{M}D_x^{(2)\beta}u(0,s)\right)=0$$

If the necessary actions are taken here

$$U(p,s)=\frac{1}{(s^2+1)p^2} \quad (30)$$

can be found. If a double inverse M-Laplace transform is performed on both sides of the resulting $U(p,s)$, then

$$u(x,t)=\;\Gamma(\sigma+1)\frac{x^{\beta}}{\beta}sin\left(\frac{\Gamma(\gamma+1)t^{\alpha}}{\alpha}\right) \quad (31)$$

the solution is reached.

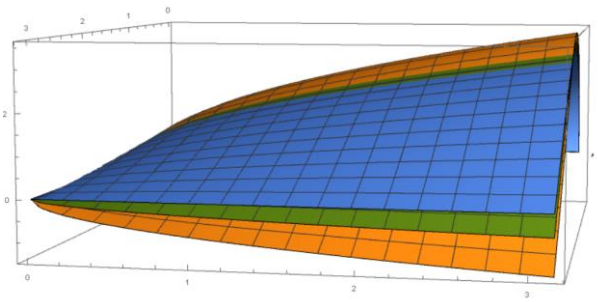


Figure 1. The image of the solution of the equation (31) for different x and t values with the values α= β=0.5, γ= σ =0, ,γ= σ =0.5 and γ = σ= 0.8

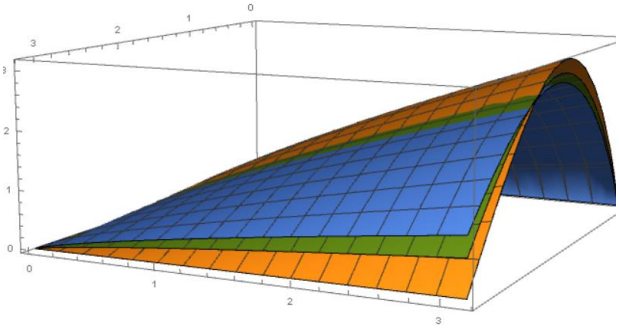


Figure 2. The image of the solution of the equation (31) for different x and t values with the values α= β=0.8, γ= σ =0, ,γ= σ =0.5 and γ = σ= 0.8

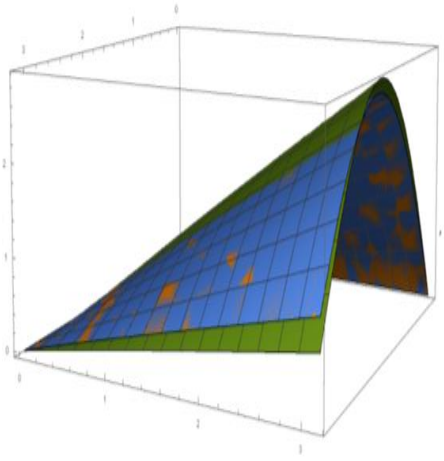


Figure 3. The image of the solution of the equation (31) for different x and t values with the values α= β=0.95, γ= σ =0, ,γ= σ =0.5 and γ = σ= 0.8

4. Visural result and scientific discusison

The double conformable derivative Laplace transform has been converted to the double M derivative Laplace form by taking advantage of increasing the parameters. (9) when we consider the equation, there are variables γ, σ, unlike the conformable fractional equation, there are variables $0 < \alpha, \beta \leq 1$, γ,σ. The parameters of the conformable derivative are α, β, t, x, while the M-derivative also varies depending on the parameters $\alpha, \beta, t, x, \gamma, \sigma$ This change is shown in Figure 1. Figure 2 and Figure 3. with different values γ=σ=0, γ=σ=0.5 and γ=σ=0.8 for $\alpha = \beta = 0.5$. γ=σ=0, γ=σ=0.5 and γ=σ=0.8 for $\alpha = \beta = 0.8$, γ=σ=0, γ=σ=0.5 and γ=σ=0.8 for $\alpha = \beta = 0.95$ the solution curves of the equation for different values γ=σ=0, γ= σ=0.5 and γ= σ=0.8 (13) The solution curves of the equation are shown. When we evaluate these solution curves, α and β tend to be the same as the conformable derivative for the value γ=σ=0, approaching the derivative in the classical sense when approaching 1. while the M-derivative comparison is made with the classical derivative by changing the α and β parameters, the derivative comparison compatible with the M-derivative is made within the values of γ, σ.

5. Conclusions

In this study, the definition of M-derivative double Laplace transforms, the theorems and values corresponding to these double M-Laplace transformations were expressed and proved. With these theorems, partial differential equations containing M −derivatives were solved using values corresponding to double M-Laplace transformations, and comparisons were made between double comformable Laplace transformations and double M-Laplace transformations by showing these solutions with graphs. It is thought that this transformation will be an effective technique for finding solutions to partial differential equations containing M-derivatives and that it will be used in modeling in mathematical, physical and engineering sciences using this technique.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft.

Author-2: Conceptualization, investigation, methodology and software, supervision and writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article

Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

6. References

Abdeljawad, T., 2015. On Conformable fractional calulus, *Journal of Computational Applied Mathematics*, 279, 57-66. https://doi.org/10.48550/arXiv.1402.6892

Bas, E., Acay, B., and Abdeljawad, T., 2020. Non-Local fractional calculus from different viewpoint generated by truncated M-derivative, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **366**, 112410. https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112410

Bas, E., Acay, B., 2020. The direct spectral problem via local derivative including truncated Mittag-Leffler function, *Applied Mathematıcs and Computation*, **366**, 124787.
https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.124787

Jarad, F., Uğurlu, E., Abdeljawad, T. and Baleanu, D., 2017. On a new class of fractional operators, *Advances in Difference Equations*, 2017;247.
https://doi.org/10.1186s13662-017-130-z

Jarad, F., Uğurlu, E., Abdeljawad, T., D., 2020. Generalized fractional derivatives and Laplace transform, *American Institute of Mathematical Sciences,* 13, 3, 709-722.
https://dx.doi.org/10.3934/dcdss.2020039.

Katugampola, U.N., 2017. A new approach to generalized fractional derivatives, *mBulletın of Mathematıcal Analysıs and Applıcatıons,* 16, 4, 1-15.
https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1106.0965

Khalil R., Al Horani, M., Yousef, A., Sababheh, M., 2014. A new definition of derivative, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 264, 65-70.
https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.01.002

Kilbas, A., A., Srivastava, H., M., and Trujillo, J., J., 2006. Theory and Applications of Fractional Differential Equations, Jan van Mill (editor), Elsevıer B. V. Amsterdam, Netherlands, 283-326.

Kurt, A.,2018. Comformable Laplace Dönüşümleri ve Uygulamaları, Doctoral Thesis, Institute of Science, Selçuk Üniversiy, 93.

Ozkan, O., Kurt, A., 2018. On Conformable double Laplace transform, *Opt quant Electron,* 50, 103.
https://doi.org/10.1007/s11082-018-1372-9

Sousa, J., V., D., C., Oliviera, E., C., D., 2017. A new Truncated M-fractional derivate type unifying some fractional derivative types with classical properties, *International Journal of Analysis and Applications,* 16, 1, 83-96.
https://doi.org/10.28924/2291-8639

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1571811
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041304 (785-797)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041304 (785-797)

Failure Prediction Using Ensemble Learning: A Comparative Study with Synthetic and Real-World Datasets

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 22.10.2024
Kabul/Accepted: 05.03.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Topluluk Öğrenmesi Kullanılarak Arıza Tahmini: Sentetik ve Gerçek Dünya Veri Setleriyle Karşılaştırmalı Bir Çalışma

Asli Beyza CIFTPINAR[1], Pelin KANAR[2], Zeynep Idil ERZURUM CICEK[2*]

[1] *Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Bursa, Türkiye*
[2] *Eskisehir Technical University Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Eskisehir, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

The ability to predict and prevent machine failures is a crucial task for businesses on a global scale at a time of increasing dependence on automation and technology. This paper primarily addressed a novel failure prediction model approach based on ensemble learning. Commonly used machine learning models including Decision Trees, K-Nearest Neighborhood, Support Vector Machines, and Logistic Regression and two different ensemble learning strategies were used: bagging and majority voting. The SZVAV real-life failure dataset provided by Lawrence Berkeley National Laboratory and the AI4I2020 Predictive Maintenance synthetic dataset were utilized to evaluate the performance of the proposed ensemble models. The preprocessing stage included the application of oversampling since there is an imbalance problem in both datasets. In this context, a comparison of three oversampling techniques was also presented for the datasets considered in the study. As a result of the tests, it was seen that the proposed models are superior to individual machine learning methods and Random Forest, which is an ensemble model itself, for the considered datasets. In addition, the proposed ensemble models were compared with the original failure prediction models previously presented in the literature on the AI4I2020 dataset, and it was reported that more successful results are obtained with the proposed approach.

Keywords *Failure prediction; Machine learning; Ensemble learning; Oversampling.*

Öz

Makine arızalarını tahmin etme ve önleme yeteneği, otomasyon ve teknolojiye olan bağımlılığın arttığı bir zamanda küresel ölçekte işletmeler için kritik bir görevdir. Bu çalışma öncelikle topluluk öğrenmeye dayalı özgün bir arıza tahmin modeli yaklaşımını ele almaktadır. Karar Ağaçları, K-En Yakın Komşuluk, Destek Vektör Makineleri ve Lojistik Regresyon dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan makine öğrenmesi modelleri ve iki farklı topluluk öğrenme stratejisi kullanılmıştır: torbalama ve çoğunluk oylaması. Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı tarafından sağlanan SZVAV gerçek yaşam arıza veri seti ve AI4I2020 Tahmini Bakım sentetik veri seti, önerilen topluluk modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Her iki veri setinde de bir dengesizlik sorunu olduğu için ön işleme aşaması aşırı örnekleme uygulamasını içermektedir. Bu bağlamda, çalışmada ele alınan veri setleri için üç aşırı örnekleme tekniğinin bir karşılaştırması da sunulmuştur. Testler sonucunda, ele alınan veri setleri için önerilen modellerin bireysel makine öğrenmesi yöntemlerinden ve kendisi bir topluluk modeli olan Rastgele Orman'dan üstün olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen topluluk modelleri, AI4I2020 veri seti üzerinden literatürde daha önce sunulan orijinal hasar tahmin modelleri ile karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımla daha başarılı sonuçlar elde edildiği raporlanmıştır.

Anahtar Kelimeler *Arıza tahmini; Makine öğrenmesi; Topluluk öğrenmesi; Aşırı örnekleme.*

1. Introduction

Equipment performance and reliability are crucial for maintaining continuous production and profitability in the dynamic world of industrial operations. However, maintenance and operations teams continue to face difficulties due to the intrinsic complexity of contemporary industrial systems and the constant demands placed on them. Unexpected equipment failure can have devastating consequences, including unplanned downtime, compromised safety, and significant financial loss. Mainly, maintenance can be described as the prevention of equipment failure and making sure that the equipment performs effectively and failurelessly, at least for the duration of its useful life. Maintenance practices are an important part of the production systems. For this reason, it is of great importance to determine these maintenance times before failures occur and to eliminate the problem before it happens. Maintenance strategies

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Zeynep Idil Erzurum Cicek e-mail: zierzurum@eskisehir.edu.tr

are essential for ensuring the reliability, efficiency, and longevity of equipment, machinery, and infrastructure in various industries. These strategies encompass a range of proactive and reactive approaches aimed at preventing equipment failures, minimizing downtime, and optimizing operational performance. Proactive maintenance includes preventive measures such as regular inspections, scheduled maintenance routines, and predictive maintenance techniques like condition monitoring and predictive analytics. On the other hand, reactive maintenance involves addressing issues as they arise, often through corrective actions and emergency repairs. A well-balanced maintenance strategy combines these elements to maximize asset availability while minimizing costs and disruptions. Additionally, advancements in technology, such as the Internet of Things (IoT) and data analytics, are playing an increasingly significant role in modern maintenance strategies, enabling organizations to harness real-time data for predictive maintenance, ultimately driving greater efficiency and cost-effectiveness. The area of predictive maintenance has arisen as an innovative reaction to urgent concerns caused by unexpected equipment breakdowns, enabling industries to move past reactive tactics and adopt proactive strategies.

Predictive maintenance (PdM) is the prediction of failures that may occur in the future by using the data obtained during the use of the machines or equipment in production. Bousdekis *et al*. (2019) emphasized that PdM benefits significantly from technological advances, using real-time detection to predict future failures. PdM, after receiving and processing some physical data (vibration, temperature, etc.) from the machinery or equipment, helps to perform just-in-time maintenance by detecting when the failure may occur, with high accuracy, sufficiently in advance. Thus, it helps to get rid of cost and time loss by performing maintenance at the estimated failure times.

Various technologies are also used in PdM. Some of those; are thermal imaging tests with thermal cameras, oil and particle test, ultrasonic test, and vibration analysis. Sectors such as manufacturing, automotive, and aviation are among the sectors where predictive maintenance is frequently applied. PdM has become a popular research area since Industry 4.0 applications become widespread. Various topics are covered under PdM, such as the prediction of machine failures, and forecasting remaining useful life (RUL). For the machine failure prediction pillar of predictive maintenance, Zhu *et al.* (2019) emphasized that knowledge-based models, traditional machine learning models, and deep learning models are used. Zonta *et al.* (2020) also highlighted the use of data-driven solutions for PdM, due to the ample data collection opportunities and use of machine learning algorithms. Dundar *et al.* (2021) stated that individual machine learning models; various ensemble models and deep learning models are used for PdM.

PdM applications for identifying machine failures also use individual machine learning models, which are typically used for failure prediction issues. Individual models for PdM include Logistic Regression (Philips *et al.* 2015), Raza *et al*. (2010), Support Vector Machines (Baptista *et al.* 2018, Mei *et al.* 2022, Gohel *et al.*2020, Shamayleh and Awad 2020, Cakir *et al.* 2021, Lee *et al*. 2019, Arslan and Tiryaki 2020), Decision Trees (Kaparthi 2020, Mei *et al.* 2022, Bukhsh 2019), K-Nearest Neighbors (Cakir *et al*. 2021), Random Forests (Cakir *et al*. 2021, Janssens *et al*. 2019, Mei *et al.* 2022), Artificial Neural Networks (Gencer *et al.* 2021, Mei *et al.* 2022, Arslan and Tiryaki, 2020). In addition to traditional machine learning models, deep learning models such as Convolutional Neural Networks (Lee *et al.* 2019, Kaya *et al.* 2022), Recurrent Neural Networks, And Long Short-Term Memory (Wu *et al.* 2020, Patra *et al.* 2022) were also utilized.

In PdM applications, ensemble learning-based methods are used as well as individual machine learning models. Hung (2021) proposed an Adaptive Boosted Decision Tree approach using the output of a Decision Jungle model based on bagging and succeed to enhance the performance of the failure prediction model. In the prediction of wind turbines main bearing failures, Beretta *et al.* (2021) presented an anomaly detection model using an ensemble method, isolation forest. Mujib and Djatna (2020) developed an ensemble machine-learning model, using a voting strategy to predict the failures of a wafer stick machine. The model which increased the prediction accuracy includes Lazy-Locally-Weighted Learning (LWL), Zero-R, J48, and Random Forest classifiers. To diagnose the refrigerant charge failures, Zhang *et al.* (2023a) developed a stacking ensemble of 5 basic classifiers, namely SVM, Random Forests, Gradient Boosting Machines, Back Propagation Neural Network (BPNN), Multi-class Logistic Regression. Khan *et al.* presented an ensemble of XGBoost, Random Forest, and Extra Tree models to predict the failures of wind turbines. Zhang *et al.* (2023b) proposed a blending ensemble model comprised of a large number of machine learning models to predict hard disk failures. In a recent study conducted by Khalil and Rostam (2024), an ensemble model consists of SVM and Adaboost proposed for failure prediction in a rotating machinery and it was demonstrated that the bagging ensemble of the mentioned individual models

enhanced the prediction performance. Similarly, ensemble learning-based models are being developed for the remaining useful life (RUL) (Gungor *et al*. 2022a, (Chen *et al.* 2021, Gungor *et al.* 2022b). Apart from the ensemble learning approach, various models have also been developed for PdM, which include a hybrid of different classifiers. (Andre *et al*. 2013, Fernandes *et al.,* 2020). To compare our study and the studies in the literature, the previous studies about failure prediction via ensemble learning are listed in Table 1.

Table 1. Comparison of this study with existing literature.

Study	Individual models	Ensemble learning strategy
Hung (2021)	Decision Jungle & Adaptive Boosted Decision Tree	Bagging & boosting
Beretta *et al.* (2021)	Artificial Neural Network & Isolation Forest	Combination through a rolling windowed sum
Mujib and Djatna (2020)	Locally weighted learning &0-R classifier& Decision Stump& Random Forest algorithm	Majority voting
Zhang *et al.* (2023a)	SVM, RF, Gradient Boosting Machine, Back Propagation Neural Network, Multi-class Logistic regression	Stacking
Khan *et al.* (2023)	XGBoost, Random Forest, and Extra Tree models	Stacking
Zhang *et al.* (2023b)	Logistic Regression, K-Nearest Neighbor, Support Vector Machine, Naïve Bayes, Random Forest, Gradient Boosting Decision Tree, Extreme Gradient Boosting, AdaBoost, Back-Propagation Neural Network, Long Short-Term Memory	Blending
Khalil and Rostam (2024)	Support Vector Machine & Adaboost	Bagging
This study	**Logistic Regression, Decision Trees, Support Vector Machines, K-Nearest Neighbor**	**Majority voting & Bagging**

Table 1 shows the position of our paper in the failure prediction literature. In our study, we aimed to develop an ensemble model structure different from the ensemble failure prediction models in the literature. For this purpose, we developed two different ensemble models using classical machine learning models and bagging and majority voting strategies. In addition, we added an oversampling process to our proposed approach to eliminate the class imbalance problem, which is a frequently encountered problem in real-life data. This increases the accuracy and robustness of the proposed failure prediction approach. This study contributes to the literature by demonstrating the effectiveness of ensemble strategies in fault prediction and provides a more reliable solution for PdM applications.

To sum up, in this study, to predict machine failures with high-performance, ensemble learning-based machine learning models are proposed. The main contributions of the study can be listed as follows:

- The class imbalance problem in the datasets was tackled with the oversampling step applied in the pre-processing step.
- Two tailored ensemble machine learning models comprised of 4 traditional machine learning algorithms – Logistic Regression, Support Vector Machines, K-Nearest Neighbor, and Decision Trees, and 2 ensemble learning strategies - majority voting and bagging, are proposed for machine failure prediction to enhance the prediction performance.
- The performance of the proposed models was compared with individual machine learning models and the Random Forest model, which is ensemble in nature.

The remaining of the study is organized as follows: In Section 2, the methodology of the study is explained, and the proposed approach is described. In Section 3, the experimental results are reported. The applicability of the proposed method and its comparison with existing studies in the literature are discussed in Section 4. The evaluation of the results obtained in the study and future work are expressed in Section 5.

2. Methodology

Since this study presents models based on ensemble learning, an overview of ensemble learning, and the considered machine learning methods is provided in this section.

2.1 Ensemble learning

Ensemble learning can be defined as an umbrella term for methods that combine multiple inducers to make a decision, typically in supervised machine learning tasks. Ensemble learning is a powerful technique in machine learning that leverages the combination of multiple individual models to improve predictive accuracy and robustness. By aggregating the knowledge of diverse models, ensemble methods can often outperform single models and mitigate the variance and the risk of overfitting (Saihood and Sonuc 2023). The three main ensemble learning methods are bagging, boosting, and stacking (Mienye and Sun 2022). Bootstrap aggregation, commonly referred to as bagging, is a widely used ensemble method that leverages the parallel combination of multiple instances of the same model to enhance

model performance and stability (Saihood and Sonuc 2023). In the Bagging (Bootstrap Aggregating) method, each of the core learners are trained with different randomly selected subsets of the training set. After the data is separated as training and test, it is 'put in the bag' of each learner by making a random selection from the data set allocated for training. The selected ones remain in the training set so that they can be selected again. In the final stage, the decisions made are combined with weighted voting. The purpose of choosing different training sets is to increase success by obtaining decision differences.

The selection of the technique used to merge the base learners is a crucial stage in the construction of ensemble classifiers. The combination mechanism is often determined by the type of ensemble learning approach being employed. Once the underlying models are trained, the combination rule can be used in bagging and boosting. Majority voting is the method most frequently used to aggregate ensemble base models. By aggregating the results from individual models' predictions, a voting ensemble operates. When classifying data, each label's predictions are summed together, and the label with the greatest number of votes is predicted.

2.2 Logistic regression

A statistical classification model for the estimate of a categorical variable in which the dependent variable is binary is known as logistic regression (LR). The fundamental idea behind LR is based on probability. As a cost function, LR uses the sigmoid function to constrain the output value to the range of 0 and 1. Regression assumptions are the same as classical regression in logistic regression except for the dependent variable is binary (Demir and Karaboga 2021).

2.2 Decision trees

A decision tree (DT), a non-parametric supervised learning method, builds classification or regression models using a tree-like topology. To generate a model that predicts the value of a target variable, the goal is to learn simple decision rules generated from the data attributes. Models of trees called classification trees allow the target variable to take a discrete value. The branches of these tree structures represent the features, and the leaves represent the class labels that are combined to make the class labels.

2.3 Support vector machines

One of the most popular machine learning methods for classification problems is Support Vector Machines (SVM) a supervised learning method developed by Vapnik (1995) based on statistical learning theory. The purpose of SVMs is to find a hyperplane that classifies data points separately in an N-dimensional feature space. Many hyperplanes can be chosen to classify data belonging to two classes. However, SVM finds the hyperplane with the maximum margin among these hyperplanes. In this optimization problem, the margin is defined as the shortest distance between the decision boundary, the hyperplane, and any sample in the data set. SVM may correctly classify data that cannot be separated linearly by employing kernel functions including linear, polynomial, and radial basis functions.

2.4 K-nearest neighbor

One of the simplest and most popular classification algorithms, K-Nearest Neighbor (KNN), works by calculating the minimal distance between a data point and each of its k-nearest neighbors. The number of nearest neighbors, or parameter k, can be hard to specify but is essential to classifier accuracy. The KNN method can be summed up in the following phases because it is relatively straightforward (Raschka 2015). First, the distance metric and the number k are determined. The sample that needs to be categorized then has k closest neighbors. The class label is finally chosen by a majority vote.

2.5 Random forest

Random Forest, first introduced by Breiman (2001), is an ensemble learning technique that builds a large number of decision trees during the training phase for classification and regression tasks. The class that the majority of the trees choose is the random forest's output for classification tasks. Genuer *et al.* (2010) explain the principle of RF as to combine many binary decision trees built using several bootstrap samples coming from the learning sample L and choosing randomly at each node a subset of explanatory variables *X* (Erzurum Cicek and Kamisli Ozturk 2022).

3. Experimental Study

3.1 Dataset

One of the simplest and most popular classification algorithms, K-Nearest Neighbor (KNN), works by in the study, two failure detection datasets are used to test the proposed approach. The first one is AI4I 2020 Predictive Maintenance Dataset (UCI Machine Learning Repository 2020). The AI4I 2020 Predictive Maintenance Dataset is a synthetic dataset that mimics actual PdM data seen in the manufacturing sector. The dataset includes 10000 data

points and comprises 14 columns, including one column indicating the presence or absence of failure and five columns representing different failure types. The identification variables for the records and products are denoted as unique identifier (UID) and product ID, respectively. The remaining six columns—type, air temperature, process temperature, rotational speed, torque, and tool wear—represent the dataset's features. Table 2 presents the descriptive statistics of these features.

Table 2. Descriptive statistics for AI4I2020 Predictive Maintenance dataset.

Numerical features					
Feature	**Unit**	**Min**	**Max**	**Mean**	**St. Dev.**
Air temperature	K	295.3	304.5	300.005	2.000
Process temperature	K	305.7	313.8	310.006	1.484
Rotational speed	rpm	1168	2886	1538.776	179.284
Torque	Nm	3.8	76	39.987	9.969
Tool wear	min	0	253	107.951	63.654
Categorical features					
Feature	**Value range**		**Frequency**	**Percent (%)**	
Type	L: Low		6000	60	
	M: Medium		2997	29.97	
	H: High		1003	10.03	

Table 3. Descriptive statistics for SZVAV dataset.

Feature	**Unit**	**Min**	**Max**	**Mean**	**St.Dev.**
Supply Air Temperature	^oF	49.55	104.6	71.427	11.155
Supply Air Temperature Heating Set	^oF	53.04	72.5	61.810	9.612
Supply Air Temperature Cooling Set	^oF	55.04	72.5	65.479	8.263
Outdoor Air Temperature	^oF				
Mixed Air Temperature	^oF	58.99	89.1	70.533	5.279
Return Air Temperature	^oF	66.33	90.28	75.127	4.774
Supply Air Fan Status	-	1	1	1	0
Supply Air Fan Speed Control Signa	-	0.1	0.5	0.277	0.179
Outdoor Air Damper Control Signal	-	0	1	0.540	0.465
Return Air Damper Control Signal	-	0	1	0.480	0.485
Exhaust Air Damper Control Signal	-	-0.04	0.9	0.471	0.434
Cooling Coil Valve Control Signal	-	0	1	0.297	0.411
Heating Coil Valve Control Signal	-	0	1	0.0699	0.109
Occupancy Mode Indicator	-			0.500	0.500

The other dataset, which was generated by Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) for an air handling unit (AHU) and a single zone variable air volume (SZVAV) AHU in LBNL's FLEXLAB test facility (Granderson 2019). This dataset is one of the automated failure detection and diagnostics (AFDD) testing data sets created by LBNL, PNNL, NREL/ORNL, and Drexel University. There are 15840 samples and 14 features in SZVAV dataset. The features in the dataset are supply air temperature, supply air temperature heating set point, supply air temperature cooling set point, outdoor air temperature, mixed air temperature, return air temperature, supply air fan status, supply air fan speed control signal, outdoor air damper control signal, return air damper control signal, exhaust air damper control signal, cooling coil valve control signal, heating coil valve control signal, and occupancy mode indicator. Table 3 presents the descriptive statistics of these features.

Figure 1 displays a summary of samples from both datasets that are failure and non-failure in numbers. In the figures, 1 corresponds to states with a failure, 0 for cases without a failure. As can be seen in Figure 1, the distribution of samples with and without failures in both datasets is imbalanced.

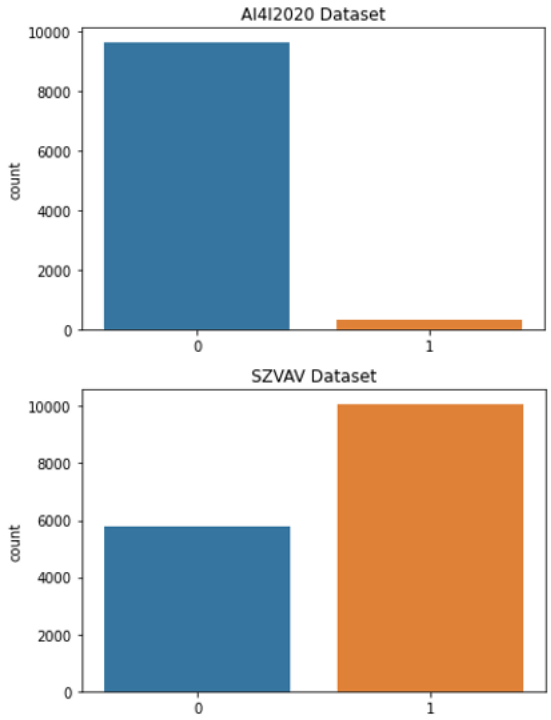


Figure 1. The counts of class labels (failure:1 and non-failure:0) in the considered datasets

3.2 Data pre-processing

A preprocessing step was applied to bot of the datasets before testing the proposed ensemble learning models. In the first stage, columns that were thought to be irrelevant in the datasets were deleted. Secondly, the missing data

in both datasets were checked, and it was concluded that there was no missing data problem in AI4I2020 Data, while missing data was detected in two features - supply air temperature heating set point and supply air temperature cooling set point in SZVAV dataset. The missing data were imputed with the mean values of the relevant feature columns. After these preprocessing steps, min-max normalization was applied to the datasets to enhance model performance. For each feature in both datasets, min-max-normalization formulated in Equation 1 was applied to scale the data between 0 and 1:

$$x_i' = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

where x_i' is scaled value of x_i from data *x*. Table 1 provides the minimum and maximum values for each feature that was taken into consideration.

As mentioned in the previous section, the number of samples of class labels with and without failures is imbalanced in both datasets. In an imbalanced dataset, the data belonging to one class is significantly more in number than the data belonging to the other class, causing the class with less data to not be learned sufficiently by machine learning methods (Ay and Yolacan, 2022). The imbalance problem is an important problem that needs to be eliminated because it will not show the performance of the ensemble models to be proposed in the study and the individual models to be used for comparison. For this reason, this imbalance problem should be eliminated before the tests (Akgul et al., 2020).

A way to deal with imbalanced data is to stabilize the data with resampling methods (Aydin, 2022). As resampling techniques, undersampling or oversampling can be applied to balance the number of class labels in the dataset. In this study, it was decided to apply the oversampling procedure to overcome the imbalance problem.

Oversampling can be defined as increasing the amount of minority class instances or samples by producing new instances or repeating some instances (Mohammed et al., 2020). Numerous oversampling techniques, including SMOTE, ADASYN, random oversampling, and SVMSMOTE, are described in the literature. Random oversampling, SMOTE and ADASYN, which are the most used oversampling methods, were used in this study.

3.3 Proposed ensemble models

Two ensemble models are proposed in this study. Both proposed models include SVM, KNN, LR and DT classifiers. The difference between the models is the ensemble type. The first ensemble is based on the majority voting, the other is based on the bagging technique. Random subsamples are generated for the bagging ensemble using the original training dataset, while the entire training set is used to train each classifier in the voting ensemble model. Ensemble1 is referred to as the majority voting ensemble, while Ensemble2 is referred to as the bagging ensemble. The structure of the proposed models is visualized in Figure 2.

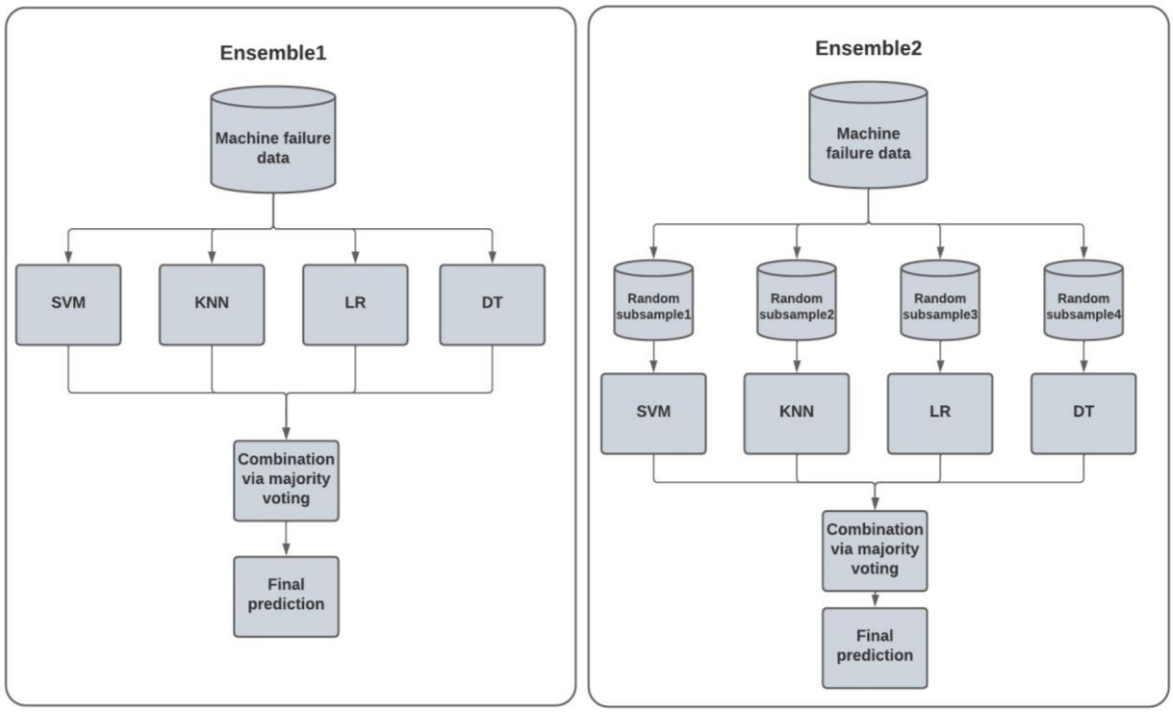


Figure 2. The structure of the proposed ensemble models

3.3 Computational experiments and results

Before testing the mentioned individual and proposed ensemble machine learning models, grid search method was used to determine algorithm parameters. For each classifier, training and tests were carried out by choosing the best combination of parameters among the parameter sets. Table 4 provides a summary of the parameter sets that were evaluated by grid search: Accuracy and F-score metrics were chosen to compare test performances. The formulations of the accuracy and F-score metrics are given in Equations 2-5, respectively.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TN + FP} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TN + FN} \quad (4)$$

$$F - score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

The tests were first started with individual machine-learning models. At this stage, first, the imbalance problem in the data was resolved, and then the training and testing processes were carried out by using the best parameter combinations obtained with the individual models.

The average accuracy and F-score values obtained as a result of the training and testing processes applied with the 10-fold cross-validation method are reported on the basis of the oversampling method in Table 5 and F-scores are visualized in Figure 3.

According to the F-score values obtained, it can be said that the RF model performs better than other models for AI4I 2020 dataset. For SZVAV dataset, SVM model mostly outperformed other individual classifiers.

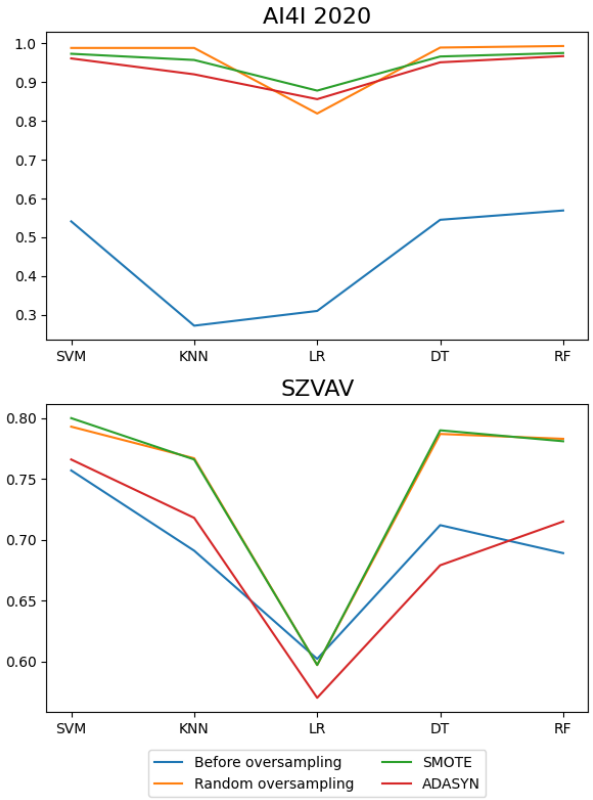


Figure 3. The test results for the individual models

Table 5. The test results for individual models.

Dataset	Oversampling method	Performance metric	SVM	KNN	LR	DT	RF
AI4I 2020	Before oversampling	Accuracy	0.974	0.971	0.971	0.969	0.977
		F-score	0.541	0.272	0.310	0.545	0.569
	Random oversampling	Accuracy	0.988	0.987	0.814	0.990	0.993
		F-score	0.988	0.988	0.819	0.990	0.993
	SMOTE	Accuracy	0.973	0.956	0.876	0.965	0.975
		F-score	0.973	0.957	0.878	0.966	0.976
	ADASYN	Accuracy	0.961	0.922	0.857	0.952	0.967
		F-score	0.961	0.920	0.856	0,951	0.967
SZVAV	Before oversampling	Accuracy	0.748	0.673	0.651	0.684	0.660
		F-score	0.757	0.691	0.602	0.712	0.689
	Random oversampling	Accuracy	0.848	0.837	0.722	0.844	0.850
		F-score	0.793	0.767	0.597	0.787	0.783
	SMOTE	Accuracy	0.851	0.836	0.721	0.843	0.849
		F-score	0.8	0.766	0.597	0.79	0.781
	ADASYN	Accuracy	0.814	0.771	0.677	0.721	0.767
		F-score	0.766	0.718	0.570	0.678	0.715

In addition, tests were performed without oversampling, so the effect of oversampling was demonstrated. As can be seen from the results, although the accuracy values are high before oversampling, the F-score values are quite low. Regardless of the method, when oversampling was applied, F-score values increased noticeably, and accuracy values improved. It has been demonstrated once again that the accuracy metric does not reflect the prediction performance fairly in imbalanced datasets and these results once again revealed the fact that working with imbalanced data can be misleading.

In the Ensemble2 model, each subsample is randomly generated. Therefore, for a reliable and fair comparison, 10 runs were made for both proposed ensemble models. It is ensured that the training and test sets in each run are generated randomly. The averages of accuracy and F-score values obtained as a result of the tests are reported in Table 6. The results clearly show that the proposed ensemble models increase prediction success in accuracy and F-score metrics.

The comparison of the performance of individual models with the proposed ensemble models is visualized in Figure 4. In addition, the results of different oversampling methods on the prediction performance can be observed in Figure 4. It is clear that the proposed ensemble models that combine individual models with both majority voting-only and bagging has improved prediction performance. Again, it is seen that the proposed models increase the prediction performance compared to RF.

It is concluded that ensemble models are clearly superior to individual models, especially in the SZVAV dataset containing real-life data. This indicates that the prediction success will be quite high in a PdM application where the proposed models will be included. Lastly, if we evaluate the prediction performance in terms of oversampling methods, it is seen that it does not significantly affect the performance of the ensemble models proposed in the study. However, applying oversampling increased the performance of all models in terms of F-score value for both datasets.

Table 6. The test results for the best individual and the proposed ensemble model.

		SVM	KNN	LR	DT	RF	Ensemble1	Ensemble2
AI4I2020	Accuracy	0.988	0.987	0.876	0.990	0.993	0.996	0.994
	F-score	0.988	0.988	0.878	0.990	0.993	0.996	0.994
SZVAV	Accuracy	0.848	0.837	0.602	0.843	0.850	0.976	0.976
	F-score	0.793	0.767	0.722	0.790	0.783	0.975	0.975

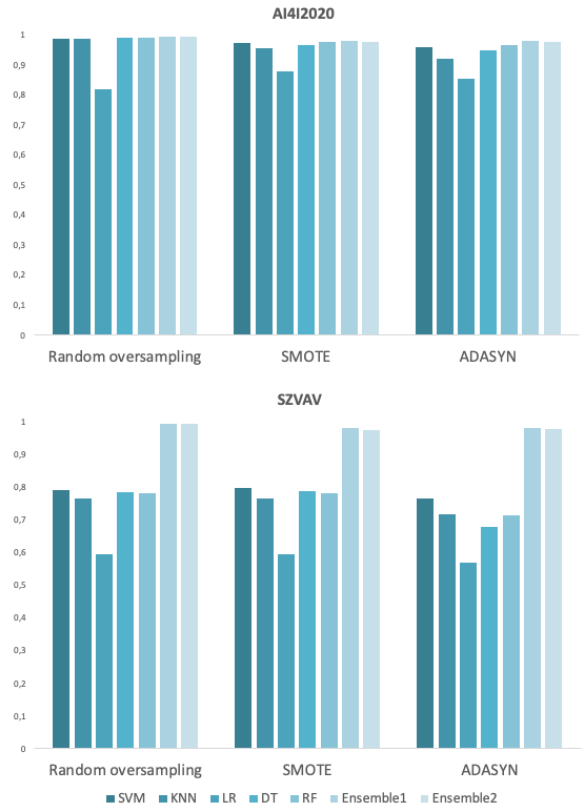


Figure 4. The test results for individual and proposed ensemble models based on different oversampling methods

To examine the usability of the proposed models in PdM applications, the tested models were evaluated in terms of training and testing times. The CPU times of the ensemble models and individual machine learning models proposed in the study are given in Table 7.

Table 7. CPU times of or individual and proposed ensemble models (sec).

	AI4I2020		SZVAV	
	Training	Test	Training	Test
SVM	2.028	0.065	16.499	0.163
KNN	0.018	0.064	0.145	0.594
LR	0.613	0.003	0.500	0.003
DT	0.044	0.002	0.054	0.194
RF	6.693	0.209	10.486	0.346
Ensemble1	28.260	0.589	8.882	0.563
Ensemble2	18.643	0.573	10.945	0.566

Although the training times of ensemble models are higher than individual models, they average around 16 seconds. This is due to the processes of generating random subsamples and combining or selecting the results of the individual models included in them. When the test times are examined, it is seen that the test times

increase in the ensemble models due to the reasons set forth for the training periods. However, test times are around 0.5 seconds for ensemble models, which is a very short time for early detection of the failure.

4. Discussion

In addition to the CPU time comparison, we analyzed the possible true and false failure alarms that would occur assuming that the proposed ensemble models are implemented in a PdM application. Moreover, with this analysis, the failure rates that the developed models could not detect the failures were also revealed. The calculated ratios are visualized in Figure 5.

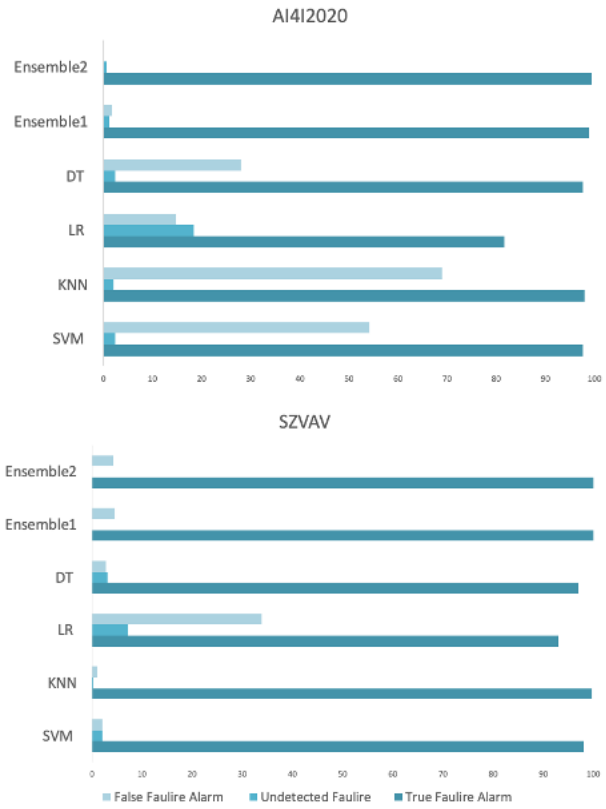


Figure 5. The test results for individual and proposed ensemble models based on different oversampling methods.

In the AI4I 2020 dataset, while reaching the best alarm levels with the proposed ensemble models; the undetected failure rate is very low. The false failure alarm rate has been greatly reduced for the AI4I2020 dataset. While 100% correct alarm rate was achieved for the SZVAV dataset; The undetected failure rate is 0%. False failure rates for the SZVAV dataset are already quite low in models other than LR, and although ensemble models seem to increase the false failure alarm rate, this rate is only 4%.

We reviewed previous studies using the same datasets in the literature to show the effectiveness of the proposed models performed. While there are more studies in the literature on the AI4I2020 dataset, studies on the SZVAV dataset are limited. In this regard, we compared the results obtained in the study with the results of the ensemble learning models we proposed through accuracy and F-score metrics. In a very recent study that we reached for this purpose, Liao *et al*. (2025) proposed a stacking model, Advanced Community Trees (AET), and compared the performance of this algorithm with the results of previous studies. In addition to this study, we reached one of the latest research conducted by Shaheen *et al*. (2023). In this paper, a novel machine failure prediction models, namely JRIP and JRIP-CSE, were proposed and tested with the AI4I 2020 predictive maintenance dataset. The comparison made based on the table in Liao *et al.* (2025) for the AI4I 2020 dataset is given in Table 8.

Table 8. The results of the comparison with a previous studies utilizing AI4I 2020 dataset.

Study	Model	Accuracy	F-score
This study	**Ensemble1**	**0.996**	**0.996**
	Ensemble2	**0.994**	**0.994**
Shaheen *et al.* (2023)	JRIP	0.984	0.983
	JRIP-CSE	0.985	0.984
Chen *et al*. (2022)	CatBoost	0.9867	-
	SmoteNC + CatBoost	0.9670	-
	ctGAN + Catboost	0.9082	-
	SmoteNC + ctGAN + Catboost	0.8712	-
Vuttipittayamongkol, *et al*. (2022)	SVM		0.6522
	DT		0.7766
	KNN		0.4348
	RF		0.7045
	NN		0.3359
Mota *et al*. (2022)	Gradient Boosting	0.9455	0.49
	SVM	0.9100	0.38
Iantovics *et al.* (2022)	Binary Logistic Regression	0.9710	0.4407
Torcianti *et al.* (2021)	RusBoost Trees	0.9274	0.4590
Matzka (2020)	Bagged Decision Trees	0.9834	0.9234
Ghasemkhani *et al.* (2023)	Balanced K-Star	0.9875	0.9875
Liao *et al*. (2025)	AET	0.9881	0.9881

The comparison results demonstrate that the proposed ensemble learning approach outperforms existing methods in failure prediction literature on the AI4I2020 Predictive Maintenance dataset.

As previously mentioned, studies utilizing the SZVAV dataset in the literature are limited. Since existing studies report only accuracy values, comparisons are based on this metric. In this context, Table 9 presents a comparison with two recent studies using this dataset.

Table 9. The results of the comparison with a previous studies utilizing SZVAV dataset.

Study	Model	Accuracy
This study	**Ensemble1**	**0.996**
	Ensemble2	**0.994**
Fan *et al.* (2024)	Parallel semi-supervised learning with active learning	0.7581
Fan *et al.* (2023)	Fully Connected Neural Network	0.75
	Graph Neural Network	0.66

Likewise, the proposed approach surpassed previous studies in the literature on the SZVAV dataset based on the accuracy metric.

One of the main advantages of the proposed approach in this study is addressing the class imbalanced problem. Unlike some previous studies where accuracy and F-score showed inconsistency due to class imbalance, our approach showed a more balanced performance between accuracy and f-score metrics for the considered datasets. These findings emphasize the usability of the proposed approach in real-world applications where the possibility of missing data problems is high. False failure alarms can cause many negative consequences such as unnecessary production interruptions, increased maintenance costs, and decreased system efficiency. The proposed ensemble model approach produces low false failure predictions with high performance. This makes it more suitable for real-world PdM applications.

Despite its strong performance, the tests show that the proposed ensemble models require higher computational power than individual machine learning models for training and testing.

5. Conclusion

In recent years, with increasing digitalization and Industry 4.0 applications, predictive maintenance applications have become widespread. Predicting failures in advance using data collected from machines via sensors prevents production losses.

In this study, individual and ensemble machine learning models were developed to predict machine failures in advance, considering various production characteristics. Performance evaluations revealed that the ensemble model, proposed using the bagging strategy, outperformed the individual models. Additionally, we assessed the proposed approach in terms of computational efficiency and compared it with existing studies in the literature, reporting the results. Our findings indicate that the proposed model demonstrates strong predictive performance.

In addition, an evaluation of the oversampling methods applied to solve the imbalance problem experienced in datasets containing events such as failures and accidents has been made, and the importance of balancing the dataset has been demonstrated once again.

The most significant limitation of the study is that the proposed approach is tested on one real-life and one synthetic dataset. To generalize the performance of our proposed ensemble models, we plan to test it on additional failure datasets. Additionally, we aim to enhance the accuracy and interpretability of the proposed ensemble models by applying a feature selection step as a preprocessing step. Future research can also include optimizing the running times of the proposed approach to be implemented in real-time PdM applications.

Ethical Statement

This study was developed as an extension of the undergraduate thesis titled "Ensemble Learning-Based Machine Learning Models for Predictive Maintenance Applications". Preliminary results obtained using synthetic datasets were presented as an abstract at the 5th International Conference on Sustainable Science and Technology (ICSuSaT-2022). The authors declare that this research was conducted in accordance with ethical principles and academic integrity standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization, Funding acquisition.

Author-2: Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization.

Author-3: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing - original draft, Funding acquisition.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are openly available in references (U. M. L. Repository, 2020), (Granderson, 2019).

Acknowledgements

This study is supported by Eskisehir Technical University, Turkey Scientific Research Projects Committee (22LOP171) and TUBITAK 2209-A - Research Project Support Programme for Undergraduate Students.

References

Akgül, G., Çelik, A. A., Ergül Aydın, Z. and Kamışlı Öztürk, Z., 2020, Hipotiroidi hastalığı teşhisinde sınıflandırma algoritmalarının kullanımı. *Bilişim Teknolojileri Dergisi,* **13,** 255 – 268.

https://doi.org/10.17671/gazibtd.710728.

Andre, A. B., Beltrame, E. and Wainer, J., 2013. A combination of support vector machine and k-nearest neighbors for machine fault detection. *Applied Artificial Intelligence,* **27,** 36–49. https://doi.org/10.1080/08839514.2013.747370

Arslan, B. and Tiryaki, H., 2020. Prediction of railway switch point failures by artificial intelligence methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,* **28,** 1044–1058. https://doi.org/10.3906/elk-1906-66

Ay, A.K. and Yolacan, E. N., 2022. Yeniden Örnekleme Metotlarının Kredi Kartı Sahtecilik Tespiti için Topluluk Öğrenmesine Kapsamlı Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* **22**, 1005-1015. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1066453

Aydın, M. A., 2022. Müşteri kaybı tahmininde sınıf dengesizliği problemi, *Politeknik Dergisi*, **25,** 351 – 360. https://doi.org/10.2339/politeknik.734916

Baptista, M., Sankararaman, S., Medeiros, I. P. de, Nascimento, C., Prendinger, H. and Henriques, E. M., 2018. Forecasting fault events for predictive maintenance using data-driven techniques and ARMA modeling. *Computers Industrial Engineering,* **115**, 41–53. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.033

Beretta, M., Vidal, Y., Sepulveda, J., Porro, O. and Cusidó, J., 2020. Improved Ensemble Learning for Wind Turbine Main Bearing Fault Diagnosis. *Applied Sciences*, **11(16),** 7523. https://doi.org/10.3390/app11167523

Bousdekis, A., Lepenioti, K., Apostolou, D. and Mentzas G. 2019, Decision making in predictive maintenance: Literature review and research agenda for industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, **52,** 607–612. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.226

Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning* **45,** 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Bukhsh, Z.A., Saeed, A., Stipanovic, A. and Doree, A. G., 2019. Predictive maintenance using tree-based classification techniques: A case of railway switches. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **101**, 35–54. https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.001

Cakir, M., Guvenc, M. A. and Mistikoglu, S., 2021. The experimental application of popular machine learning algorithms on predictive maintenance and the design of iot based condition monitoring system. *Computers Industrial Engineering*, **15,** 106948. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106948

Chen, C. H., Tsung, C. K. and Yu, S. S., 2022. Designing a hybrid equipment-failure diagnosis mechanism under mixed-type data with limited failure samples. *Appl Sci*, **12**, 9286. https://doi.org/10.3390/app12189286

Chen, C., Zhu, Z. H., Shi, J., Lu, N. and Jiang, B., 2021. Dynamic predictive maintenance scheduling using deep learning ensemble for system health prognostics. *IEEE Sensors Journal,* **21**, 26878–26891. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119553.

Cortes, C. and Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. *Machine Learning,* **20 (3)**, 273–297. https://doi.org/10.1007/BF00994018

Demir, I. and Karaboga, H.A., 2021. Modeling mathematics achievement with deep learning methods. *Sigma J Eng Nat Sci,* **39**, 33–410. https://doi.org/10.14744/sigma.2021.00039

Dundar, D. R. , Saricicek, I., Cinar, E. and Yazici, A., 2021. Kestirimci bakimda makine ogrenmesi: Literatür arastirmasi. *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg*, **29,** 256–276. https://doi.org/10.31796/ogummf.873963

Erzurum Cicek, Z. I. and Kamisli Ozturk, Z, 2022. Prediction of fatal traffic accidents using one-class SVMs: a case study in Eskisehir, Turkey*, International Journal of Crashworthiness,* **27 (5)**, 1433–1443. https://doi.org/10.1080/13588265.2021.1959168

Fan. C., Lin, Y., Piscitelli, M. S., Chiosa, R., Wang, H., Capozzoli, A. and Ma, Y., 2023. Leveraging graph convolutional networks for semi-supervised fault diagnosis of HVAC systems in data-scarce contexts. *Building Simulation*, **16**, 1499-1517. https://doi.org/10.1007/s12273-023-1041-1

Fan, C., Wu, Q., Zhao, Y. and Mo. L., 2024. Integrating active learning and semi-supervised learning for improved data-driven HVAC fault diagnosis performance. *Applied Energy*, **356**, 122356. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122356

Fernandes, S., Antunes, M., Santiago, A. R., Barraca, J. P., Gomes, D., Aguiar, R. L., 2020. Forecasting appliances failures: A machine-learning approach to predictive maintenance. *Information,* **11(4)**, 208. https://doi.org/10.3390/info11040208.

Gencer, A., Yumusak, R., Ozcan, E. and Eren, T., 2021. An artificial neural network model for maintenance planning of metro trains. *Journal of Polytechnic,* **24,** 811–820. https://doi.org/10.2339/politeknik.693223

Genuer, R., Poggi, J.-M. and Tuleau-Malot, C., 2010. Variable selection using random forests, *Pattern Recognition Letters,* **31,** 2225–2236. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.014

Ghasemkhani, B., Aktas, O. and Birant, D., 2023. Balanced k-star: An explainable machine learning method for

internet-of-things- enabled predictive maintenance in manufacturing. *Machines*, **11**, 322. https://doi.org/10.3390/machines11030322

Gohel, H. A., Upadhyay, H., Lagos, L., Cooper, K. and Sanzetenea, A., 2020. Predictive maintenance architecture development for nuclear infrastructure using machine learning, *Nuclear Engineering and Technology,* **52**, 1436–1442. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.029.

Gungor, O., Rosing, T. and Aksanli, B., 2022. Stewart: Sacking ensemble for white-box adversarial attacks towards more resilient data-driven predictive maintenance. *Computers in Industry,* **140**, 103660. https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103660.

Gungor, O., Rosing, T.S. and Aksanli, B., 2022. Dowell: Diversity-induced optimally weighted ensemble learner for predictive maintenance of industrial internet of things devices. *IEEE Internet of Things Journal*, **9,** 3125–3134. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3097269.

Hung, Y.-H., 2021. Improved ensemble-learning algorithm for predictive maintenance in the manufacturing process, *Applied Sciences*, **11(15)**, 6832. https://doi.org/10.3390/app11156832.

Iantovics, L.B. and Enachescu, C., 2022. Method for data quality assessment of synthetic industrial data. *Sensors*, **22,** 1608. https://doi.org/10.3390/s22041608.

Janssens, O., Loccufier, M. and Van Hoecke, S., 2019. Thermal imaging and vibration-based multisensor fault detection for rotating machinery. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **15**, 434–444. https://doi.org/10.1109/TII.2018.

Kaya, Y., Kuncan, F. and Ertunc, H. M., 2022. A new automatic bearing fault size diagnosis using time-frequency images of cwt and deep transfer learning methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **30,** 1851–1867. https://doi.org/10.55730/1300-0632.3909.

Khalil, A. F. and Rostam, S., 2024. Machine Learning-based Predictive Maintenance for Fault Detection in Rotating Machinery: A Case Study. *Engineering, Technology & Applied Science Research,* **14**, 13181-13189. https://doi.org/10.48084/etasr.6813

Khan, P. W., Yeun, C. Y. and Byun, Y. C., 2023. Fault detection of wind turbines using SCADA data and genetic algorithm-based ensemble learning. *Engineering Failure Analysis*, **148,** 107209. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107209

Lee, W. J., Wu, H., Yun, H., Kim, H., Jun, M.B., and Sutherland, J. W., 2019. Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data. *Procedia CIRP*, **80**, 506-511. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.019

Liao, Y., Li, M., Sun, Q. and Li P., 2025. Advanced stacking models for machine fault diagnosis with ensemble trees and SVM. *Applied Intelligence*, **55**, 251. https://doi.org/10.1007/s10489-024-06206-2.

Matzka, S., 2020. *Explainable artificial intelligence for predictive maintenance applications*. 2020 Third international conference on artificial intelligence for industries (ai4i). 69–74. https://doi.org/10.1109/AI4I49448.2020.00023.

Mei, Y., Sun, Y., Li, F., Xu, X., Zhang, A. and Shen, J., 2022. Probabilistic prediction model of steel to concrete bond failure under high temperature by machine learning. *Engineering Failure Analysis,* **142,** 106786. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106786.

Mienye, I.D. and Sun, Y., 2022. A survey of ensemble learning: Concepts, algorithms, applications, and prospects. *IEEE Access,* **10,** 99129–99149. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3207287.

Mohammed, R., Rawashdeh, J. and Abdullah, M., 2020. *Machine learning with oversampling and undersampling techniques: Overview study and experimental results*. 2020 11th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS). 243–248. https://doi.org/10.1109/ICICS49469.2020.239556.

Mota, B., Faria, P. and Ramos, C., 2022. *Predictive maintenance for maintenance-effective manufacturing using machine learning approaches.* International workshop on soft computing models in industrial and environmental applications. 13– 22. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18050-7_2

Mujib, A. and Djatna, T., 2020 *Ensemble learning for predictive maintenance on wafer stick machine using IoT sensor data*. 2020 International Conference on Computer Science and Its Application in Agriculture (ICOSICA). 1-5. https://doi.org/10.1109/ICOSICA49951.2020.9243180.

Patra, K., Sethi, R. N. and Behera, D. K., 2022. Anomaly detection in rotating machinery using autoencoders based on bidirectional LSTM and GRU Neural Networks. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,* **30,** 1637–1653. https://doi.org/10.55730/1300-0632.3870

Phillips, J., Cripps, E., Lau, J. W. and Hodkiewicz, M., 2015. Classifying machinery condition using oil samples and binary logistic regression. *Mechanical Systems and Signal Processing,* **60-61**, 316–325. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.12.020

Raschka, S., 2015. Python Machine Learning, Packt Publishing Ltd.

Raza, J., Liyanage, J. P., Al Atat, H. and Lee, J., 2010. A comparative study of maintenance data classification based on neural networks, logistic regression and support vector machines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **16,** 303–318. https://doi.org/10.1108/13552511011072934.

Saihood, Q. and Sonuc E., 2023. A practical framework for early detection of diabetes using ensemble machine learning models. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,* **31**, 722–738. https://doi.org/10.55730/1300-0632.4013.

Shamayleh, A. J. F. and Awad, M., 2020. Iot based predictive maintenance management of medical equipment. *J Med Syst.*, **44**, 72. https://doi.org/10.1007/s10916-020-1534-8.

Shaheen, A., Hammad, M., Elmedany, W., Ksantini, R. and Sharif, S., 2023. Machine failure prediction using joint reserve intelligence with feature selection technique. *International Journal of Computers and Applications,* **45**, 638–646. https://doi.org/10.1080/1206212X.2023.2260619.

Shashidhar Kaparthi, D. B., 2020. Designing predictive maintenance systems using decision tree-based machine learning techniques. *International Journal of Quality & Reliability Management,* **37, 4,** 659-686. https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2019-0131.

Torcianti, A. and Matzka, S., 2021. *Explainable artificial intelligence for predictive maintenance applications using a local surrogate model.* 2021 4th International conference on artificial intelligence for industries (ai4i), Laguna Hills, CA, USA, 86–88. https://doi.org/10.1109/AI4I51902.2021.00029.

Vuttipittayamongkol, P. and Arreeras, T., 2022. *IEEE Data-driven industrial machine failure detection in imbalanced environments*. 2022 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management (IEEM), Kuala Lumpur, Malaysia, 1224–1227. https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989673

Wu, H., Huang, A. and Sutherland, J. W., 2020. Avoiding environmental consequences of equipment failure via an LSTM-based model for predictive maintenance. *Procedia Manufacturing*, **43,** 666–673. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.131

Zhang, L., Cheng, Y., Zhang, J., Chen, H., Cheng, H., and Gou, W., 2023. Refrigerant charge fault diagnosis strategy for VRF systems based on stacking ensemble learning. *Building and Environment*, **234**, 10209. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110209.

Zhang, M., Ge, W., Tang, R. and Liu, P., 2023. Hard Disk Failure Prediction Based on Blending Ensemble Learning. *Applied Sciences,* **13**, 3288. https://doi.org/10.3390/app13053288.

Zhu, T., Ran, Y. and Wen, Y., 2019. A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches-Arxiv.org. https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.07383

Zonta, T. , Costa, C. A. da, Rosa Righi, R. da, Lima, M. J. de, Trindade, E. S. da and Li, G. P., 2020. Predictive maintenance in the industry 4.0: A systematic literature review. *Computers Industrial Engineering,* **150,** 106889. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889.

Internet References

AI4I 2020 Predictive Maintenance Dataset [Dataset]. (2020). UCI Machine Learning Repository. https://doi.org/10.24432/C5HS5C.

Granderson, J. G. L., 2019. Inventory of datasets for afdd evaluation, https://data.openei.org/files/910/lbnldatasynthesisinventory.pdf

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1514404
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 041305 (798-803)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 041305 (798-803)

A Novel Perspective on Resolving the Discounted Transportation Problem

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.07.2024
Kabul/Accepted: 14.03.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

İndirimli Taşıma Problemine Yeni Bir Bakış

Nurdan KARA*

Naval Training and Education Command, Kocaeli, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract
Transportation problems are optimization problems that aim to maximize profit or minimize costs by transporting products from suppliers to destinations. In cases where the unit transportation cost depends on the quantity transported and these quantities are expressed as intervals, a piecewise function structure emerges. In our study, this interval structure was addressed by converting the problem into an integer programming problem using an existing method from the literature, and the solution was obtained. Furthermore, an example problem from the literature is solved using our method, and the results are compared.

Keywords: *Transportation problem; Separable Programming; Piecewise cost function; Weighting.*

Öz
Taşıma problemleri, ürünlerin tedarikçilerden varış noktalarına taşınarak karın maksimize edilmesi veya maliyetlerin minimize edilmesini hedefleyen optimizasyon problemleridir. Birim taşıma maliyetinin taşınan mal miktarına bağlı olduğu ve bu miktarların aralıklarla ifade edildiği problemlerde, parçalı fonksiyon yapısı ortaya çıkmaktadır. Çalışmamızda, bu tür bir aralık yapısını çözmek için literatürde mevcut bir yöntem kullanılarak problem tamsayılı bir probleme dönüştürülmüş ve çözüm gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan bir örnek problem yöntemimizle çözülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Taşıma problemi; Ayrılabilir programlama; Parçalı maliyet fonksiyonları; Ağırlıklandırma.*

1. Introduction

The classical transportation problem (TP) is a specific variant of a linear programming (LP) problem. To minimize overall transportation costs and increase profit, a homogeneous product must be delivered from multiple origins to multiple destinations. In this problem, sources refer to entities that provide goods or services, such as suppliers, production centers, factories, etc., whereas demands represent entities that require or consume these goods or services, such as clients, warehouses, sinks, etc. Furthermore, when the aggregate demand is equal to the aggregate supply, the transportation problem is seen as being in a state of equilibrium. These types of problems are called balanced transportation problems. Various methods are available for addressing the transportation problems.

Studies by Kumar et al. (2019), Mitlif et al. (2020), Singh and Singh (2021), and Das et al. (2021a) discuss how the transportation cost determines the transportation amount. However, recent transportation policies generally distribute transportation costs based on the transportation amount. Therefore, there is a need to develop a transportation model that takes this situation into account. For example, in today's competitive market, there are different policies, such as the discount policy (Manerba et al. 2018; Khan et al. 2021) and the credit period policy (Panja and Mondal 2020; Mashud et al. 2020). Suppliers use these policies to increase buyers' purchasing quantities.

The cost of transportation per unit from a supply source to a demand center may depend on the quantity shipped. In this case, it allows price discounts to be offered to customers. These quantities can be expressed in finite intervals. In other words, problems arise where the quantity discount is expressed as a piecewise linear function. Such problems are known as discount transportation problems.

In the real world, it is common practice to offer discounts for purchasing large quantities of a particular good and shipping large amounts (Hadley, 1963). For example, shipping companies may offer quantity discounts that encourage larger shipments. In this case, discount transportation problems arise because they address scenarios where the cost per unit varies depending on the quantity taken. Due to the nonlinear cost structure, such problems involve additional complexity compared to standard transportation problems. Balachandran and Perry (1976) gave a branch and bound method for the all-

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Nurdan KARA e-posta/e-mail: nurdancetin@gmail.com

unit quantity discount problem, which they show will also work for the incremental quantity discount problem as well as fixed charge transportation problems. Also, this approach is like the one suggested by Falk and Soland (1969) for solving the general non-convex type of math program. In addition, logistics managers frequently encounter escalating quantity discounts when selecting the optimal transit option. When there are several supply locations and a range of destinations for cargo to be transported, this can happen via road, rail, or sea. The selection of transportation method is contingent upon the volume of goods to be transported and the combined costs, including both ongoing and fixed expenses, connected with each mode. Put simply, the task of selecting freight transport options can alternatively be represented as a transportation problem with a piecewise linear objective function (McKeown 1980). Vogt and Even (1972) examined the scenario of the piecewise-linear transportation problem that arises from U.S. freight prices.

In real-world problems, transportation costs can be variable due to changing demand levels, fluctuating fuel prices, and evolving market conditions. The discounted transportation problem is a special kind of the classical transportation problem that tries to find a solution to this changing structure of transportation costs.

Separable programming is an optimization method that deals with problems in which the objective function and constraints can be divided into several, smaller functions. This programming converts a non-linear problem into a linear or piecewise-linear problem, facilitating resolution by linear programming methods. Falk and Soland (1969) presented an algorithm for separable nonconvex programming problems. Li and Yu (1999) presented a new method of deriving the global optimum of a nonconvex separable programming program using less number of 0–1 variables. Huang (2009) proposed an effective linear approximation method for separable programming problems. Hochbaum and Shanthikumar (1990) presented a general-purpose algorithm for converting procedures that solve linear programming problems with or without integer variables to procedures for solving the respective nonlinear separable problems. Zhang and Xu (2010) study inverse optimization for linearly constrained convex separable programming problems, which are used a lot in business and industry.

Besides separable programming, the literature also includes convex combination methods and transformations of piecewise linear functions. These methodologies employ distinct problem-solving strategies. We used a mix of lambda weights and binary variable methods in this study to solve transportation problems with piecewise linear cost coefficients.

The piecewise linear function structure is mostly applied to fixed-charge transportation problems. Christensen and Labbé (2015) presented an exact solution method for the transportation problem with piecewise linear costs. This problem is fundamental within supply chain management and is a straightforward extension of the fixed-charge transportation problem. Altassan et al (2013) studied near-optimal solutions for the step-fixed charge transportation problem.

This study comprehensively addresses the discounted transportation problem and summarizes its formulation. In our case, cost values vary depending on the amount of goods transported, and the problem is nonlinear. In other words, our problem contains piecewise linear functions. The proposed method has considered each piece separately and obtained a solution through a model using binary variables. In addition, an example in the literature has been adapted and solved, and a comparative analysis has been performed.

Our approach utilizes a combination of lambda weights and binary variables for transportation problems. The main problem with our approach is that as the number of segments grows, lambda weights and binary variables add more restrictions, making it harder to solve the problem. The principal advantage of our approach is its capacity to linearize non-linear problems, especially those of small scale.

The article is structured as follows: The next section introduces the model of the discounted transportation problem. Section 3 presents the separating programming using different approaches, and Section 4 gives a numerical example to present a method. The final section includes some results.

2. Materials and Methods

This section contains three subsections. The mathematical formulation of the discounted transportation problem and the solution methodology are defined in the first and second subsections. Subsequently, we address a numerical example from the literature to demonstrate our solution methodology.

2.1 The Discounted Transportation Problem

Let the discounted TP (DTP) with m supplies, n demands, have the capacities a_i and b_j, respectively. And assume that the cost of the objective function $Z(\mathbf{x})$ is denoted by c_{ij} which corresponds to x_{ij}. Then, a DTP may be represented as:

$$\min Z(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = a_i \ , \ i = 1,2,\ldots,m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = b_j \ , \ j = 1,2,\ldots,n \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

where $a_i > 0 \quad \forall i$; $b_j > 0 \quad \forall j$; $c_{ij} \geq 0$, $\forall i, j$ and the balanced equality holds, that is $\sum_{i=1}^{m} a_i = \sum_{j=1}^{n} b_j$. Let the feasible region of DTP given by (1-4) be denoted by S . Also, the unit transportation costs are decided through a discount policy, i.e. ,

$$c_{ij} = \begin{cases} c_{ij}^1, & \text{if} \quad T_0^{ij} \leq x_{ij} < T_1^{ij} \\ c_{ij}^2, & \text{if} \quad T_1^{ij} \leq x_{ij} < T_2^{ij} \\ \ldots & \\ c_{ij}^k, & \text{if} \quad T_{k-1}^{ij} \leq x_{ij} < T_k^{ij} \end{cases} \quad (5)$$

where $c_{ij}^1 > c_{ij}^2 > \ldots > c_{ij}^k$. Here, the extreme values of the subintervals are represented by T_k^{ij} , while the values of the c_{ij} in this interval are represented by c_{ij}^k . It follows that problem (1-4) is a nonlinear problem.

2.2 Separable Programming

In this section, we will introduce the offered approach. Also, this problem is nonlinear in nature because of the structure of c_{ij} . We will explain our methodology. First and foremost, the piecewise linear function c_{ij} is composed of *k* subintervals. (The piecewise linear function's accuracy is dependent on the breakpoints. (seen in equation 5)). Let a_k^{ij} represent the weight of the left end of each interval, b_k^{ij} denote the weight of the right end of interval, and λ_k^{ij} signify the binary variable associated with the component.

As these breaking points increase, the number of λ_k^{ij} values in equation (5) also increases, which may cause calculation difficulties. In this particular scenario, it is possible to formulate the subsequent equations.

$$c_{ij} = c_{ij}^1 \lambda_1^{ij} + c_{ij}^2 \lambda_2^{ij} + \ldots + c_{ij}^k \lambda_k^{ij} \ ; \ \lambda_k^{ij} \in \{0,1\} \quad (6)$$

$$x_{ij} = (a_1^{ij} T_0^{ij} + b_1^{ij} T_1^{ij}) + (a_2^{ij} T_1^{ij} + b_2^{ij} T_2^{ij}) + \ldots + (a_k^{ij} T_{k-1}^{ij} + b_k^{ij} T_k^{ij})$$

; T_k^{ij} endpoints of subinterval (7)

$$\lambda_k^{ij} = a_k^{ij} + b_k^{ij} \ ; \ a_k^{ij}, b_k^{ij} \in [0,1] \quad (8)$$

Therefore, we can express it as the sum of functions using equations (7) and (8).

By making the necessary arrangements, the problem (1-4) can be converted to the following equivalent problem:

$$\min Z(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

s.t.

$$c_{ij} = c_{ij}^1 \lambda_1^{ij} + c_{ij}^2 \lambda_2^{ij} + \ldots + c_{ij}^k \lambda_k^{ij} \ ; \ \lambda_k^{ij} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$x_{ij} = (a_1^{ij} T_0^{ij} + b_1^{ij} T_1^{ij}) + (a_2^{ij} T_1^{ij} + b_2^{ij} T_2^{ij}) + \ldots + (a_k^{ij} T_{k-1}^{ij} + b_k^{ij} T_k^{ij}) \quad (11)$$

$$\lambda_k^{ij} = a_k^{ij} + b_k^{ij} \ ; \ a_k^{ij}, b_k^{ij} \in [0,1] \quad (12)$$

$$\mathbf{x} \in S \quad (13)$$

With the help of the linear objective function and binary variable, problem (1-4) becomes easier to solve. The solution to problem (1-4) can be attained by addressing the previously indicated problem.

2.3 Numerical Examples

This section offers a method to solve the problems we adapted from the literature.

Example 1: Let us consider a DTP with the following characteristics:

$$\min Z(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} c_{ij} x_{ij} \quad (14)$$

s.t.

$$x_{11} + x_{12} = a_1 = 40 \ ; \ x_{21} + x_{22} = a_2 = 10 \ ; \quad (15)$$

$$x_{11} + x_{21} = b_1 = 30 \ ; \ x_{12} + x_{22} = b_2 = 20 \ ; \quad (16)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (17)$$

Here c_{11}, c_{12}, c_{21} and c_{22} can be written as:

$$c_{11} = \begin{cases} 10, & \text{if} \quad 0 \leq x_{11} < 10 \\ 8, & \text{if} \quad 10 \leq x_{11} < 20 \\ 6, & \text{if} \quad 20 \leq x_{11} < 50 \end{cases} , \ c_{12} = \begin{cases} 9, & \text{if} \quad 0 \leq x_{12} < 5 \\ 7, & \text{if} \quad 5 \leq x_{12} < 15 \\ 5, & \text{if} \quad 15 \leq x_{12} < 45 \end{cases}$$

$$c_{21}=\begin{cases}6, & \text{if } 0\le x_{21}<5\\ 4, & \text{if } 5\le x_{21}<10\\ 3, & \text{if } 10\le x_{21}<30\end{cases},\quad c_{22}=\begin{cases}8, & \text{if } 0\le x_{22}<7\\ 6, & \text{if } 7\le x_{22}<10\\ 4, & \text{if } 10\le x_{22}<27\end{cases}.$$

Let us apply our solution methodology to the first variable c_{11} as a piecewise function and formulate our new restrictions.

$$c_{11}=10\lambda_1^{11}+8\lambda_2^{11}+6\lambda_3^{11}$$
$$x_{11}=(a_1^{11}.0+b_1^{11}.10)+(a_2^{11}.10+b_2^{11}.20)+(a_3^{11}.20+\lambda_3^{11}.50)$$
$$\lambda_1^{11}=a_1^{11}+b_1^{11},\ \lambda_2^{11}=a_2^{11}+b_2^{11},\ \lambda_3^{11}=a_3^{11}+b_3^{11}$$
$$a_1^{11},b_1^{11},a_2^{11},b_2^{11},a_3^{11},b_3^{11}\in[0,1]$$
$$\lambda_1^{11},\lambda_2^{11},\lambda_3^{11}\in\{0,1\}$$

Other c_{ij} 's can be written in a similar way. So, problem (14-17) can be written as follows:

$$\min Z(\mathbf{x})=c_{11}x_{11}+c_{12}x_{12}+c_{21}x_{21}+c_{22}x_{22}$$

s.t.

$$c_{11}=10\lambda_1^{11}+8\lambda_2^{11}+6\lambda_3^{11}$$
$$x_{11}=(a_1^{11}.0+b_1^{11}.10)+(a_2^{11}.10+b_2^{11}.20)+(a_3^{11}.20+\lambda_3^{11}.50)$$

$$c_{12}=9\lambda_1^{12}+7\lambda_2^{12}+5\lambda_3^{12}$$
$$x_{12}=(a_1^{12}.0+b_1^{12}.5)+(a_2^{12}.5+b_2^{12}.15)+(a_3^{12}.15+\lambda_3^{12}.45)$$

$$c_{21}=6\lambda_1^{21}+4\lambda_2^{21}+3\lambda_3^{21}$$
$$x_{21}=(a_1^{21}.0+b_1^{21}.5)+(a_2^{21}.5+b_2^{21}.10)+(a_3^{21}.10+\lambda_3^{21}.30)$$

$$c_{22}=8\lambda_1^{22}+6\lambda_2^{22}+4\lambda_3^{22}$$
$$x_{22}=(a_1^{22}.0+b_1^{22}.7)+(a_2^{22}.7+b_2^{22}.10)+(a_3^{22}.10+\lambda_3^{22}.27)$$

$$x_{11}+x_{12}=40\ ;\ x_{21}+x_{22}=10\ ;$$

$$x_{11}+x_{21}=30\ ;\ x_{12}+x_{22}=20\ ;$$

$$x_{ij}\ge 0$$

$$\lambda_1^{ij},\lambda_2^{ij},\lambda_3^{ij}\in\{0,1\},\ i=1,2;\ j=1,2$$

$$a_k^{ij},b_k^{ij}\in[0,1],\ k=1,2,3$$

Solve the problem to obtain

$$X=\{x_{11}=x_{12}=20,\quad x_{21}=10,\quad x_{22}=0\}$$

$$c=\{c_{11}=6,\ c_{12}=5,\quad c_{21}=3,\ c_{22}=8\}$$

$$Z=250$$

Example 2: Let us apply the proposed solution procedure to the following problem adapted from Balachandran and Perry (1976). Table 1 below gives the supplies, demands, and costs for each range of shipment.

If all the given parameter values are correctly substituted into the equations or expressions in Problem (1-4),

$$\min Z(\mathbf{x})=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}c_{ij}x_{ij} \tag{18}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{4}x_{1j}=a_1=80\ ;\ \sum_{j=1}^{4}x_{2j}=a_2=90 \tag{19}$$

$$\sum_{j=1}^{4}x_{3j}=a_3=55 \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^{3}x_{i1}=b_1=70\ ;\ \sum_{i=1}^{3}x_{i2}=b_2=60 \tag{21}$$

$$\sum_{i=1}^{3}x_{i3}=b_3=35\ ;\ \sum_{i=1}^{3}x_{i4}=b_4=60 \tag{22}$$

$$x_{ij}\ge 0 \tag{23}$$

is obtained. Here $c_{14}=4,\ x_{14}\le 30$; $c_{21}=6,\ x_{21}\le 20$; $c_{24}=15$. On imprecise costs, discounts decrease with the unity of the unit cost. For example, c_{23} can be written as:

$$c_{23}=\begin{cases}5, & \text{if } 65\le x_{22}<75\\ 6, & \text{if } 20\le x_{22}<65\\ 8, & \text{if } 0\le x_{22}<20\end{cases}.$$

First, each x_{ij} value is written using the endpoints and their corresponding weights for each interval. Then, c_{ij} values are written with the help of lambdas, which are binary variables. Then, by substituting the x_{ij} values, we obtain the following equation, corresponding to equation (9-13), into which we transformed our main equation.

$$\min Z(\mathbf{x})=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}c_{ij}x_{ij} \tag{24}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{4}x_{1j}=a_1=80\ ;\ \sum_{j=1}^{4}x_{2j}=a_2=90 \tag{25}$$

$$\sum_{j=1}^{4}x_{3j}=a_3=55 \tag{26}$$

$$\sum_{i=1}^{3}x_{i1}=b_1=70\ ;\ \sum_{i=1}^{3}x_{i2}=b_2=60 \tag{27}$$

$$\sum_{i=1}^{3}x_{i3}=b_3=35\ ;\ \sum_{i=1}^{3}x_{i4}=b_4=60 \tag{28}$$

$$c_{ij}=c_{ij}^1\lambda_1^{ij}+c_{ij}^2\lambda_2^{ij}+c_{ij}^3\lambda_3^{ij},\ i=1,2;\ j=1,2,3,4 \tag{29}$$

$$\lambda_1^{ij},\lambda_2^{ij},\lambda_3^{ij}\in\{0,1\} \tag{30}$$

$$x_{ij}=(a_1^{ij}T_0^{ij}+b_1^{ij}T_1^{ij})+(a_2^{ij}T_1^{ij}+b_2^{ij}T_2^{ij})+(a_3^{ij}T_2^{ij}+b_3^{ij}T_3^{ij}) \tag{31}$$

$$\lambda_k^{ij}=a_k^{ij}+b_k^{ij};\ a_k^{ij},b_k^{ij}\in[0,1];\ k=1,2,3 \tag{32}$$

$$x_{ij}\ge 0 \tag{33}$$

Table 1. Supplies, demands, and costs

	1	2	3	4	Warehouse capacity
1	$\begin{cases}3, & 20 \le x_{11} < \infty \\ 4, & 10 \le x_{11} < 20 \\ 5, & 0 \le x_{11} < 10\end{cases}$	$\begin{cases}6, & 10 \le x_{12} \le 15 \\ 7, & 5 \le x_{12} < 10 \\ 8, & 0 \le x_{12} < 5\end{cases}$	$\begin{cases}3, & 27 \le x_{11} < 60 \\ 4, & 15 \le x_{11} < 27 \\ 5, & 5 \le x_{11} < 15\end{cases}$	One price bracket 4 Upperbound 30	80
2	Upperbound 20 (One price bracket) 6	$\begin{cases}5, & 65 \le x_{22} < 75 \\ 6, & 20 \le x_{22} < 65 \\ 8, & 0 \le x_{22} < 20\end{cases}$	$\begin{cases}8, & 10 \le x_{11} < 25 \\ 9, & 5 \le x_{11} < 10 \\ 10, & 0 \le x_{11} < 5\end{cases}$	One price bracket 15	90
3	$\begin{cases}1, & 27 \le x_{11} < 60 \\ 2, & 20 \le x_{11} < 27 \\ 3, & 0 \le x_{11} < 20\end{cases}$	$\begin{cases}3, & 60 \le x_{11} < \infty \\ 4, & 30 \le x_{11} < 60 \\ 5, & 0 \le x_{11} < 30\end{cases}$	$\begin{cases}10, & 20 \le x_{11} < 30 \\ 11, & 10 \le x_{11} < 20 \\ 12, & 0 \le x_{11} < 10\end{cases}$	$\begin{cases}5, & 30 \le x_{11} < 50 \\ 6, & 20 \le x_{11} < 30 \\ 7, & 0 \le x_{11} < 20\end{cases}$	55
Market Demand	70	60	35	60	

Because substituting these values for every c_{ij} would be a lengthy and arduous process, we will only provide the corresponding constraints for c_{23} as an illustrative example below.

Thus, we can write it as

$$c_{23} = c_{23}^{1}\lambda_1^{23} + c_{23}^{2}\lambda_2^{23} + c_{23}^{3}\lambda_3^{23} \Rightarrow c_{23} = 5\lambda_1^{23} + 6\lambda_2^{23} + 8\lambda_3^{23}$$

$$x_{23} = (a_1^{23}T_0^{23} + b_1^{23}T_1^{23}) + (a_2^{23}T_1^{23} + b_2^{23}T_2^{23}) + (a_3^{23}T_2^{23} + b_3^{23}T_3^{23})$$

$$x_{23} = (a_1^{23}65 + b_1^{23}75) + (a_2^{23}20_1 + b_2^{23}65) + (a_3^{23}0 + b_3^{23}20)$$

and $\lambda_1^{23} = a_1^{23} + b_1^{23}$, $\lambda_2^{23} = a_2^{23} + b_2^{23}$, $\lambda_3^{23} = a_3^{23} + b_3^{23}$.

By solving Problem (24-33) and substituting all the values, the solution to Problem (18-23) is obtained.

3. Results and Discussions

By implementing the proposed method and making the necessary adjustments, the problem (9-13) mentioned above can be resolved. The model corresponds to (9-13) generates the following solution X:

$$X = \begin{Bmatrix} x_{11} = 23, x_{12} = 0, x_{13} = 27, x_{14} = 30, x_{21} = 20, x_{22} = 60, \\ x_{23} = 8, x_{24} = 2, x_{31} = 27, x_{32} = 0, x_{33} = 0, x_{34} = 28 \end{Bmatrix}$$

with $c = \begin{Bmatrix} c_{11} = 3, c_{12} = 8, c_{13} = 3, c_{14} = 4, c_{21} = 6, c_{22} = 6, \\ c_{23} = 9, c_{24} = 15, c_{31} = 1, c_{32} = 5, c_{33} = 12, c_{34} = 6 \end{Bmatrix}$

, $Z = 1047$.

In the example we adapted, $Z = 1011$, and the value we obtained is $Z = 1047$, which is very close to this degree.

$$X = \begin{Bmatrix} x_{11} = 23, x_{12} = 0, x_{13} = 27, x_{14} = 30, x_{21} = 20, x_{22} = 60, \\ x_{23} = 8, x_{24} = 2, x_{31} = 27, x_{32} = 0, x_{33} = 0, x_{34} = 28 \end{Bmatrix}$$

with $c = \begin{Bmatrix} c_{11} = 3, c_{12} = 8, c_{13} = 3, c_{14} = 4, c_{21} = 6, c_{22} = 6, \\ c_{23} = 9, c_{24} = 15, c_{31} = 1, c_{32} = 5, c_{33} = 12, c_{34} = 6 \end{Bmatrix}$

, $Z = 1047$.

In the example we adapted, $Z = 1011$, and the value we obtained is $Z = 1047$, which is very close to this degree. To perform the calculations, the General Algebraic Modeling System (GAMS) program is used, and the calculations are carried out on a computer equipped with 8 GB of RAM and a 1.99 GHz processor.

4. Conclusions

In the realm of transportation optimization, our research tackles the intricate "discounted transportation problem". This problem provides cost reductions directly linked to the shipping volume of goods. The key twist lies in the cost structure: unlike standard problems with a fixed cost per unit, here, the cost per unit depends on the quantity shipped. This variation is effectively captured by a piecewise linear function, which functions as a staircase, with each step representing a different cost based on the quantity range. The "fragmented" nature of the cost coefficients, where multiple costs vary depending on the volume shipped, complicates the use of traditional methods designed for constant costs. To overcome this hurdle, our research proposes a novel approach. We transform the complex cost function into a simpler structure that incorporates binary variables. This simplifies the problem and allows for the application of more powerful optimization techniques. However, this transformation using binary variables also highlights the limitations of standard methods. Specialized algorithms or adaptations of existing ones might be necessary to fully exploit the new structure and solve the problem efficiently. The effectiveness of our approach is not just theoretical; we've successfully solved a related problem to validate it.

In further research, we intend to investigate multi-objective transportation, solid transportation, and scenarios using fuzzy coefficients.

Declaration of Ethical Standards

This article is a revised and expanded version of the paper titled "A New Approach for Solving Transportation Problems with Quantity Discount," which was presented orally at the International Conference on Applied Analysis and Mathematical Modeling 2024 (Istanbul, Turkey, July 19-23) but was not published in full text.

Credit Authorship Contribution Statement

The author contributed to the study conception, design, material preparation, data collection, and analysis.

Declaration of Competing Interest

The author has no conflicts of interest to declare regarding the content of this article

5. References

Altassan, K. M., El-Sherbiny, M. M., & Sasidhar, B. (2013). Near optimal solution for the step fixed charge transportation problem. *Applied Mathematics & Information Sciences*, *7*(2), 661-669.

Balachandran, V. and Perry, A.,1976. Transportation type problems with quantity discounts. *Naval Research Logistics Quarterly*, **23(2)**, 195-209.

Christensen, T. R., & Labbé, M. (2015). A branch-cut-and-price algorithm for the piecewise linear transportation problem. *European journal of operational research*, *245*(3), 645-655.

Das, S.C., Manna, A.K., Rahman, M.S., Shaikh, A.A. and Bhunia, A.K., 2021a. An inventory model for non-instantaneous deteriorating items with preservation technology and multiple credit periods-based trade credit financing via particle swarm optimization. *Soft Computing*. **25 (7)**, 5365–5384. http://dx.doi.org/10.1007/s00500-020-05535-x.

Falk, J. E., & Soland, R. M. (1969). An algorithm for separable nonconvex programming problems. *Management Science*, *15*(9), 550-569.

Hadley, G. and T.M. Whitin.,1963. Analysis of Znventory Systems (Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Hochbaum, D. S., & Shanthikumar, J. G. (1990). Convex separable optimization is not much harder than linear optimization. *Journal of the ACM (JACM)*, *37*(4), 843-862.

Huang, C. H. (2009). An effective linear approximation method for separable programming problems. *Applied mathematics and computation*, *215*(4), 1496-1506.

Khan, M.A.A., Shaikh, A.A. and Cárdenas-Barrón, L.E., 2021. An inventory model under linked-to-order hybrid partial advance payment, partial credit policy, all-units discount and partial backlogging with capacity constraint. *Omega*, **103**, 102418. http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2021.102418.

Kumar, R., Edalatpanah, S.A., Jha, S. and Singh, R., 2019. A Pythagorean fuzzy approach to the transportation problem. *Complex Intell. Syst*., **5 (2)**, 255–263. http://dx.doi.org/10.1007/s40747-019-0108-1.

Li, H. L., and Yu, C. S., 1999. A global optimization method for nonconvex separable programming problems. *European Journal of Operational Research*, **117(2)**, 275-292.

Manerba, D., Mansini, R. and Perboli, G., 2018. The capacitated supplier selection problem with total quantity discount policy and activation costs under uncertainty. *Int. J. Prod. Econ*., **198**, 119–132. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.035.

Mashud, A.H.M., Wee, H.M., Sarkar, B. and Li, Y.H.C., 2020. A sustainable inventory system with the advanced payment policy and trade-credit strategy for a two-warehouse inventory system. Kybernetes**, 50 (5)**, 1321–1348. http://dx.doi.org/10.1108/K-01-2020-0052

McKeown PG. 1980. Solving incremental quantity discounted transportation problems by vertex ranking. *Naval Research Logistics Quarterly*, *27*(3), 437-445.

Mitlif, R.J., Rasheed, M., Shihab, S., 2020. An optimal algorithm for a fuzzy transportation problem. J. Southwest Jiaotong Univ. 55 (3), 1-10 http://dx.doi.org/10.35741/issn.0258-2724.55.3.7.

Panja, S., Mondal, S.K., 2020. Exploring a two-layer green supply chain game theoretic model with credit linked demand and mark-up under revenue sharing contract. J. Clean. Prod. 250, 119491. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119491.

Singh, G., Singh, A., 2021. Extension of particle swarm optimization algorithm for solving transportation problem in fuzzy environment. Appl. Soft Comput. 110, 107619. http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107619.

Vogt L, Even J. “Piecewise linear programming solutions of transportation costs as obtained from rate tariffs”. *AIIE Transactions*, *4*(2), 148-153,1972.

Zhang, J., & Xu, C. (2010). Inverse optimization for linearly constrained convex separable programming problems. *European Journal of Operational Research*, *200*(3), 671-679.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1491786
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045201 (804-815)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045201 (804-815)

Konvolüsyon İşlemi Üzerinde GPU Eniyileme Yöntemlerinin Etkisi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 29.05.2024
Kabul/Accepted: 05.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Impact of GPU Optimization Techniques on Convolution Operation

Kadir Emre ÖZER*, Sercan DEMİRCİ[2]

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Konvolüsyon, birçok görüntü işleme algoritmasında kullanılan önemli bir yöntemdir. Convolutional Neural Network (CNN) ve benzeri birçok sinir ağı yapısının giriş katmanlarında konvolüsyon işlemine yer vermesinden dolayı günümüzde daha da önemli bir duruma gelmiştir. Bu sinir ağı modellerinin çok büyük veri kümeleri üzerinde çalışmasından dolayı konvolüsyon işleminde gerçekleştirilebilecek küçük bir iyileştirme, genel başarımı büyük oranda etkileyebilecektir. Bu çalışmada, GPU tabanlı bir konvolüsyon algoritmasının verimliliğini artırmak amacıyla bir takım eniyileme yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, bellek erişimlerini azaltmaya yönelik iş parçacığı başına daha fazla veri işlemenin ve var olan bellek erişimlerinin yükünü azaltmak için adanmış belleklerin kullanımı üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak, iş parçacığı başına değişken oranlarda veri işlemenin 2,33-2,45 kat arasında değişken hızlanma sağladığı, adanmış belleklerin kullanımının bu oranı 2,50-2,60 aralığına taşıdığı ölçülmüştür. Bunun yanı sıra, çıktı görüntüsünün belleğe yazılması sırasında bellek erişimlerinin daha büyük veri yapılarında birleştirilmesi (vektörleştirilmiş bellek erişimi) bu hız artışını 2,95-3,22 aralığına çıkarmıştır. Önerilen yöntemin en iyi durumda OpenCV ve ArrayFire kütüphane işlevlerine kıyasla sırasıyla 2,72-2,96 ve 4,23-4,68 kat arasında değişen oranlarda daha hızlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *GPGPU; CUDA; Konvolüsyon; İş Parçacığı Kalınlaştırma; Eniyileme; Paralel Programlama.*

Abstract

Convolution is an important method used in many image processing algorithms. It has become even more significant today due to its incorporation in the input layers of Convolutional Neural Networks (CNN) and many similar artificial neural network models. Since these neural network models operate on very large datasets, even a minor improvement in the convolution operation can significantly impact overall performance. In this study, the effects of several optimization methods aimed at enhancing the efficiency of a GPU-based convolution algorithm were examined. Specifically, the focus was on processing more data per thread to reduce memory accesses and utilizing dedicated memory to lower the cost of existing memory accesses. As a result, it was measured that processing varying amounts of data per thread provided a speedup ranging from 2.33x to 2.45x, while the use of dedicated memory increased this range to 2.50x-2.60x. Additionally, packaging memory accesses into larger data structures (vectorized memory access) during the writing of the output image to memory further boosted this speedup to a range of 2.95x-3.22x. The proposed method was found to be 2.72x-2.96x and 4.23x-4.68x faster, respectively, compared to OpenCV and ArrayFire library functions in the best case.

Keywords: *GPGPU; CUDA; Convolution; Thread Coarsening; Optimization; Parallel Programming.*

1. Giriş

Konvolüsyon, birçok görüntü işleme ve bilgisayarlı görü uygulamasında gürültü giderme, kenar bulma ve anlamlandırma gibi amaçlarla görüntüleri filtrelemek için kullanılan bir yöntemdir (İnt. Kyn-1). Convolutional Neural Network (İnt. Kyn-2) ve benzeri sinir ağı yapılarının konvolüsyon aracılığı ile ön işleme gerçekleştirmesi, bu işlemin günümüzdeki önemini artırmıştır. Sinir ağı yapılarının yüksek işlem gücü gereksinimi ve büyük veri kümeleri üzerinde çalışmasından dolayı konvolüsyon işleminde yapılacak ufak bir başarım artışı, yürütme süresinde gözle görülür ölçüde düşüşe neden olabilecektir.

Grafik İşleme Birimleri (GPU) birçok yürütme birimi ve yüksek bellek bant genişliği aracılığıyla veri-paralel işlemler gerçekleştirirken yüksek başarım sunan donanımlardır. Ayrıca, işlemcilere (CPU'lara) göre çok daha yüksek oranda aritmetik mantık birimi içermelerinden dolayı yoğun işlem gereksinimi duyulan durumlarda CPU'ya kıyasla daha yüksek başarım sağlamaktadırlar. Konvolüsyon, doğası gereği veri-paralel (her bir imgecik diğerlerinden bağımsız olarak) işlenebilir

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Kadir Emre ÖZER e-posta/e-mail: emre.ozer@bil.omu.edu.tr

olmasıyla GPU gibi çok çekirdekli işleme birimlerinde daha verimli gerçekleştirilebilmektedir.

2000'li yıllarda NVIDIA'nın Compute Unified Device Architecture (CUDA) ortamını yayınlamasıyla GPU'lar grafik işlemlerinin yanı sıra genel amaçlı işlemler için de kullanılabilir duruma gelmiştir. Böylelikle, programcılar GPU kaynaklarını kullanarak çok iş parçacıklı çalışan uygulamalar geliştirebilmiştir. CUDA aracılığıyla bir algoritmayı GPU'ya uyarlamak göreceli olarak kolaylıkla gerçekleştirilebilir olsa da birtakım nedenlerden dolayı GPU'yu yüksek verim ile kullanmak her zaman kolay bir süreç değildir. Bunun başlıca nedeni bellek erişimlerinin aritmetik işlemlere göre oldukça yavaş olmasıdır. Bu durum, algoritmaların genellikle bellek darboğazından dolayı başarımının kısıtlanmasına yol açmaktadır. GPU'nun bellek yapısı, temel bir önbellek sıradüzeninin yanı sıra programcı tarafından yönetilebilir özelleşmiş bellek alanları içermesiyle doğru kullanım koşullarında daha yüksek bellek başarımı sağlayabilmektedir.

Konvolüsyon işlemi, yatay veya dikey eksendeki ardışık imgecikler üzerinde gerçekleştirildiğinde, birtakım komşu imgecikler her iki konvolüsyon işleminde ortak (örtüşen) olmaktadır. Bunun yanı sıra, kullanılan filtre matrisi de tüm konvolüsyon işlemleri için ortaktır. Bu ardışık imgeciklerin farklı iş parçacıkları tarafından işlendiği durumda, örtüşen komşu imgecikler ve filtre matrisi için birden çok kez bellek erişimi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, yatay eksende iş parçacığı başına işlenen imgecik sayısını artırarak, filtre matrisinin ve komşu imgeciklerin yeniden kullanımı yoluyla GPU tabanlı bir konvolüsyon algoritmasının bellek erişimlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Buna ek olarak, iş yükü artırılmış iş parçacıklarının çıktı değerlerini sıralı bellek adreslerine yazması sırasında daha büyük veri yapılarının (vektörlerin) kullanılmasının, filtre matrisinin sabit bellekte (constant memory) saklanmasının ve imgecik kümelerinin yürütme sırasında paylaşımlı belleğe (shared memory) getirilmesinin bellek erişimleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

1.1 Literatür

Literatürde yer alan birtakım çalışmalar, konvolüsyon işleminin GPU mimarisindeki başarımını artırmaya yönelik çeşitli yaklaşımlar ortaya koymuştur. Bu bölümde bu çalışmalar incelenmiştir.

Werkhoven vd. (2011) filtre matrisini sabit bellekte saklamayı, bölüt (thread block) tarafından kullanılacak verileri çalışma zamanında paylaşımlı belleğe getirmeyi ve bölüt başına işlenen imgecik sayısını artırmayı (tiling) denemişlerdir. İş parçacığı başına iş yükünün artırarak filtre matrisi ve örtüşen girdi sütunları için yapılan bellek erişimlerini azaltmayı amaçlamışlardır. Bunun yanı sıra, iş yükünü (tiling factor) aygıt sınırlarını gözeterek çalışma zamanında belirlemeyi (adaptive tiling) denemişlerdir. Sonuç olarak, 4,73 kata kadar hızlanma elde ettiklerini, iş yükünü çalışma zamanında belirlemenin başarımı %37 oranında artırdığını bildirmişlerdir.

Iandola vd. (2013) iş parçacığı başına değişken iş yükü (loop unrolling) ve veriyi kullanımından önce yazmaçlara taşımayı (prefetching) denemişlerdir. Bu kapsamda ayrı bellek alanlarından yazmaçlara veri taşınmasını incelemişlerdir. Tasarladıkları algoritmaları OpenCV, ArrayFire, NPP kütüphane işlevleri ile kıyaslamışlardır. Filtre boyutuna ve verinin hangi bellekten yazmaçlara aktarıldığına göre değişmekle birlikte ArrayFire kütüphane işlevine göre 1,2-4,5 kat arasında değişen hızlanma oranlarına ulaştıklarını ve verileri paylaşımlı bellek üzerinden yazmaçlara dağıtmanın bir iyileşme sağlamadığını bildirmişlerdir.

Chen vd. (2017) verilerin yeniden kullanımını (data reuse, register reuse) sağlayabilmek için ilgili görüntü kısmını paylaşımlı belleğe getirmeyi ve dikey eksende iş parçacığı başına değişken sayıda imgecik işlemeyi önermişlerdir. Paylaşımlı bellek kullanımı ile yatay eksende örtüşen sütunlar için evrensel bellek (global memory) erişimini ortadan kaldırmayı, dikey eksende örtüşen satırlar için ise yazmaçların yeniden kullanılmasını sağlamışlardır. Bunun yanı sıra, göreceli olarak küçük boyutundan dolayı filtre matrisini sabit bellekte saklamışlardır. Farklı mimarilerde, paylaşımlı bellek bankalarında çakışmaların (bank conflict) önlenmesi amacıyla, her bir iş parçacığının yatay eksende bir bankanın boyutuna eş değer sayıda (örneğin, banka boyutu 8 byte olan Kepler mimarisinde 2 float) veri işlemesini önermişlerdir. Tasarımlarının, cuDNN kütüphane işlevlerine göre 1x1 filtre matrisi boyutunda 6,16, 3x3 boyutunda 6,43, 5x5 boyutunda 2,90 ve ortalama 5,16 kat daha başarılı olduğunu bildirmişlerdir. 3x3 filtre matrisi boyutunda iş parçacığı başına yatay eksende işlenen verinin banka genişliği ile denk olmadığı durumda başarımın %19 düştüğünü bildirmişlerdir.

Lu vd. (2020), ardışık imgecikler üzerindeki konvolüsyon işlemleri sırasında meydana gelen tekrarlı bellek erişimlerini azaltmak amacıyla iki ayrı yöntem önermiştir. Dikey eksendeki ardışık konvolüsyon işlemlerinde, örtüşen satırları filtre matrisindeki birden çok satır ile çarparak birden çok çıktı verisi işlemeyi; yatay eksendeki ardışık konvolüsyon işlemlerinde örtüşen sütunları çözgü karıştırma (warp shuffle) buyrukları ile iş parçacıklarının yazmaçları arasında dağıtmışlardır. Sonuç olarak, tasarladıkları algoritmanın ArrayFire, NPP ve cuDNN

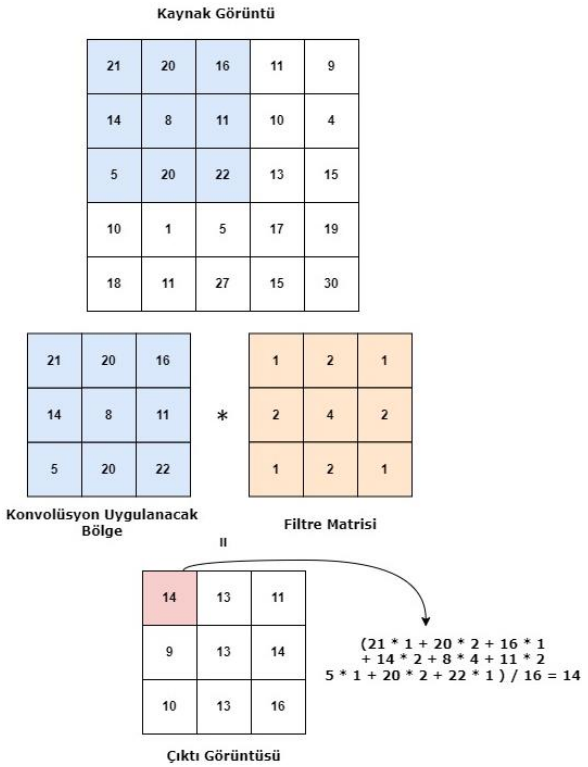
kütüphane işlevlerine kıyasla 2 kattan daha fazla hızlanma sağladığını bildirmişlerdir.

Topçu ve Öz (2022) filtre matrisini sabit bellekte saklamayı ve bölüt tarafından kullanılacak veri kümesini çalışma zamanında paylaşımlı belleğe getirmenin konvolüsyon işlemi üzerindeki etkisi incelemiştir. Bunun yanı sıra, CPU-GPU arasındaki veri aktarımlarını CUDA stream'ler ile gerçekleştirmeyi denemişlerdir. Tasarladıkları algoritmaları Kepler ve Turing mimarisine ait donanımlarda sınamışlardır. Bölüt tarafından kullanılacak veriyi paylaşımlı belleğe getirmenin Turing mimarisinde bir başarım artışı sağlamadığını, filtre matrisini sabit bellekte saklamanın önemli bir iyileştirme sağlamadığını ve CUDA stream'lerin CPU-GPU arasındaki veri aktarım gecikmelerini örttüğünü bildirmişlerdir. En iyi durumda 1,6 kata kadar hızlanma elde etmişlerdir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Konvolüsyon

Konvolüsyon, matematiksel olarak iki sinyalin katlanması (evrilmesi) sonucu üçüncü bir sinyalin elde edilmesidir. Görüntü üzerinde düşünüldüğünde girdi görüntüsü ve filtre matrisinin katlanması sonucu filtrelenmiş bir görüntünün elde edilmesidir (İnt. Kyn-3, Smith 1997). Konvolüsyon, bir görüntü üzerinde Şekil 1 ve Denklem 1'deki gibi gerçekleştirilebilir.



Şekil 1. Görüntü Üzerinde Konvolüsyon İşlemi

$$r(i) = (s * k)(i,j) = \sum_n \sum_m s(i-n, j-m) \cdot k(n,m) \qquad (1)$$

r çıktı görüntüsüne, s girdi görüntüsüne, k filtre maskesine, n dikey eksende maske boyutuna, m yatay eksende maske boyutuna ve (i,j) koordinat noktalarına karşılık gelmektedir.

2.2 CUDA

CUDA, ilk sürümü 2006 yılında yayınlanmış, NVIDIA GPU'larının genel amaçlı programlanabilmesi için tasarlanan bir paralel programlama ortamıdır. CUDA ortamı, programcının çekirdek (kernel) olarak adlandırılan işlevler aracılığı ile GPU kaynaklarını kullanarak çok iş parçacıklı çalışan uygulamalar tasarlamasına olanak sağlar. Bir çekirdek çağrılacağı zaman ızgara (grid) ve bölüt (block) derinliği parametreleri kullanılarak değişken sayıda iş parçacığının çekirdek buyruklarını eşzamanlı olarak yürütmesi sağlanır.

CUDA ortamında iki ayrı aygıt ve her bir aygıtın kendisine ait belleği olduğu varsayılır. Böylece, programcı aynı kaynak kod içerisinde GPU kaynaklarını kullanarak paralel, CPU kaynaklarını kullanarak ise seri çalışan yordamlar tasarlayabilmektedir. Bu durumda, hangi aygıtta yürütme yapılacaksa kullanılacak verilerin ilgili aygıtın belleğinde bulunması gerekmektedir. Genellikle, bellek aktarım gecikmeleri çekirdek yürütme sürelerine göre çok daha yüksek olduğundan, uygulamaların başarımını belirlemede önemli bir etken oluşturmaktadır.

2.3 GPU Mimarisi

Günümüz GPU'ları genel olarak Streaming Multiprocessor (SM) olarak adlandırılan çok çekirdekli işleme birimleri, sabit bellek, yapılandırılabilir SRAM dizileri (L1 önbellek ve paylaşımlı bellek), L2 önbellek ve aygıt belleğinden (DRAM) oluşmaktadır (Hijma *et al*. 2023, Aamodt *et al.* 2018).

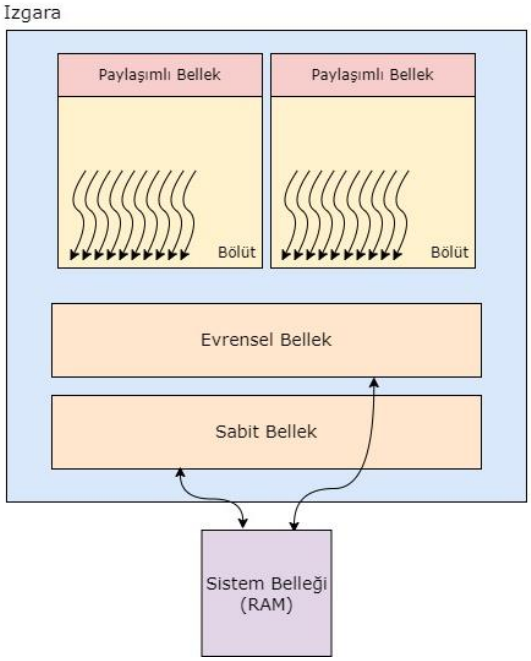
Bir çekirdek çağrımı yapıldığı zaman bölütler SM'ler üzerine dağıtılır. Devamında, bölüte ait çözgüler (warps) SM alt bölümlerine (SM sub-partition) dağıtılır ve yürütülmek için zamanlanır. Çözgü içerisindeki iş parçacıkları aynı anda aynı buyruğu işleyerek (Single Instruction Multiple Threads) yürütme işlemini gerçekleştirir. Bir SM üzerine genellikle birden çok sayıda çözgü dağıtıldığından dolayı bir çözgü yüksek gecikmeye neden olan bir buyruğu (örn. bellek erişimi) gerçekleştirirken bu sırada başka bir çözgü donanım kaynaklarını kullanabilir. Böylelikle gecikme süreleri örtülebilir.

Bir bellek buyruğu gerçekleştireceği zaman bu istek L1 önbellek, L2 önbellek ve DRAM aşamalarından sırayla geçer. Bu durumda karşılaşılabilecek en iyi durum, aranan verinin L1 önbellekte bulunmasıdır. Ancak, verinin L1 bellekte bulunup bulunmayacağı programcı tarafından yönetilebilir bir durum değildir. Bu duruma bir çözüm olarak, L1 önbelleğin bir bölümü (ya da L1 önbellekten ayrı

olarak) programcının yönetebileceği şekilde kullanıma sunulmaktadır. Sıklıkla kullanılacağı bilinen veri kümesi, programcı tarafından buraya konularak DRAM bağımlılığı büyük ölçüde azaltılabilir.

2.3.1 Adanmış Bellekler

CUDA, Şekil 2'de görüldüğü gibi programcının amacı doğrultusunda kullanabileceği türlü bellek alanları sunmaktadır.



Şekil 2. GPU Bellek Çeşitleri (Kirk and Wen-Mei 2016)

• Evrensel Bellek: Genel amaçlı bellek alanıdır. Çekirdeğin çalışması sırasında tüm iş parçacıkları için ortak olan verilerin saklanabileceği bölümdür. GPU'nun dış birimler ile veri alışverişi gerçekleştirmek için kullandığı bellek alanıdır.

• Paylaşımlı Bellek: Bölüt içindeki iş parçacıkları arasında veri paylaşımı ve iletişim işlemleri için kullanılabilen SRAM türünde bir bellek alanıdır. Günümüz mimarilerinde boyutu 16-96KB arasında değişmektedir.

• Sabit Bellek: Yürütme sırasında değişmeyecek verilerin saklanabileceği bir bellek bölümüdür. İçeriğinin değişmeyeceği bilindiğinden dolayı GPU'nun çok çekirdekli yapısında önbellek tutarsızlıklarına neden olmadan daha hızlı veri aktarımı sağlanabilir. Birçok mimaride boyutu 64 KB'dır.

2.4 Konvolüsyon İşleminin İyileştirilmesi

2.4.1 Temel Konvolüsyon Çekirdeği

Temel çekirdek, hiçbir eniyileme yöntemi kullanılmadan algoritmanın GPU üzerinde çalışabilir sürümü olarak nitelendirilebilir. Bu çekirdeğin çalışması sırasında her bir iş parçacığının iş yükü bir birim (bir imgeciği işleyecek şekilde) olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm bellek gereksinimleri evrensel bellek üzerinden karşılanmıştır. Algoritma 1'deki kod parçasında temel konvolüsyon çekirdeği gösterilmiştir.

Algoritma 1: Temel Konvolüsyon Çekirdeği

```
Input: int rows, int cols, unsigned char* input, unsigned char* output, float filter[3][3]
begin
  int ty = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;
  int tx = blockIdx.y * blockDim.y + threadIdx.y;
  int new_val = 0;
  if ((tx > 0 && tx < rows - 1) && (ty > 0 && ty < cols - 1)) {
    new_val += filter[0][0] * input[(tx – 1) * cols + ty - 1];
    new_val += filter[0][1] * input[(tx – 1) * cols + ty];
    new_val += filter[0][2] * input[(tx - 1) * cols + ty + 1];
    new_val += filter[1][0] * input[tx * cols + ty - 1];
    new_val += filter[1][1] * input[tx * cols + ty];
    new_val += filter[1][2] * input[tx * cols + ty + 1];
    new_val += filter[2][0] * input[(tx + 1) * cols + ty - 1];
    new_val += filter[2][1] * input[(tx + 1) * cols + ty];
    new_val += filter[2][2] * input[(tx + 1) * cols + ty + 1];
    output[tx * cols + ty] = new_val;
  }
end
```

rows: görüntünün satır sayısı, cols: görüntünün sütun sayısı, input: girdi görüntüsü, output: çıktı görüntüsü, filter: filtre matrisi.

2.4.2 Sabit Bellek Kullanımı

Sabit bellek, yürütme sırasında sıklıkla kullanılan değişmez nitelikteki verilerin hızlı bir şekilde iş parçacıklarına dağıtılması (broadcasting) üzere özelleşmiştir. Çözgü içerisindeki iş parçacıkları aynı anda sabit belleğin aynı adresine erişme isteğinde bulunursa tek bir bellek erişimi ile bu veri tüm iş parçacıklarına sunulabilir (Brodtkorb *et al.* 2013). Ancak, farklı adreslere erişim istenirse, erişimler serileşir ve başarım kaybına yol açar (Sanders and Kandrot 2010, Kalaiselvi *et al.* 2017). Bu nedenle, aynı anda birçok iş parçacığına sunulması gereken bir verinin sabit bellekte depolanması olumlu bir etki sağlayabilecektir. Ayrıca, sabit bellek içerisinde bulunan bir veri yürütme boyunca değişmez olacağından dolayı önbellek tutarsızlıklarına neden olmayacağından hızlı bir şekilde önbelleklenebilir (Kirk and Wen-Mei 2016).

Temel konvolüsyon çekirdeğinde (Algoritma 1) iş parçacıklarının yürütme sırasında eşzamanlı olarak aynı filtre matrisi verisine erişme olasılığı yüksek olduğundan dolayı filtre matrisini sabit bellekte saklamak evrensel bellek erişimlerini azaltmanın yanı sıra bu verilere erişim hızını da artırabilecektir.

2.4.3 Paylaşımlı Bellek Kullanımı

Paylaşımlı bellek, programcı tarafından yönetilebilir bir önbellek olarak düşünülebilir. Yonga üstü bir bellek olmasından dolayı erişim hızı evrensel belleğe göre

oldukça hızlıdır (Kalaiselvi *et al.* 2017). Bu iki özellik açısından değerlendirildiğinde, sıklıkla kullanılan verilerin paylaşımlı belleğe getirilmesi evrensel bellek erişimlerini azaltarak başarım artışı sağlayabilecektir.

Temel konvolüsyon çekirdeğinde (Algoritma 1) her bir imgecik farklı iş parçacıkları tarafından birçok kez erişilmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için veriler paylaşımlı belleğe getirilebilir. Böylece, evrensel bellek erişimlerinin azalmasıyla başarım artışı sağlanabilir.

Algoritma 2'deki kod parçasında temel konvolüsyon çekirdeğinin, girdi görüntüsünün paylaşımlı belleğe getirilmesi ile güncellenmiş sürümü gösterilmiştir.

Algoritma 2: Girdi Görüntüsünün Paylaşımlı Belleğe Kopyalanması

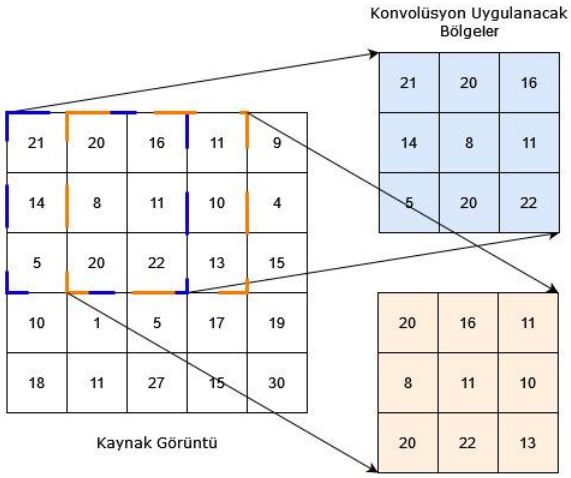
```
Input: int rows, int cols, unsigned char* input, unsigned char* output, float filter[3][3]
begin
  __shared__ unsigned char cache[34][34];
  int ty = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;
  int tx = blockIdx.y * blockDim.y + threadIdx.y;
  unsigned int cy = threadIdx.x + 1;
  unsigned int cx = threadIdx.y + 1;
  int new_val = 0;
  cache[cx][cy] = input[tx * cols + ty];
  if (cx == 1) {
    cache[0][cy] = input[((tx – 1) * cols + ty)];
  }
  if (cx == 32) {
    cache[33][cy] = input[((tx + 1) * cols + ty)];
  }
  if (cy == 1) {
    cache[cx][0] = input[(tx * cols + ty - 1)];
  }
  if (cy == 32) {
    cache[cx][33] = input[(tx * cols + ty + 1)];
  }
  __syncthreads();
  if ((tx > 0 && tx < rows - 1) && (ty > 0 && ty < cols - 1)) {
    new_val += filter[0][0] * cache[cx - 1][cy - 1];
    new_val += filter[0][1] * cache[cx - 1][cy];
    new_val += filter[0][2] * cache[cx - 1][cy + 1];
    new_val += filter[1][0] * cache[cx][cy - 1];
    new_val += filter[1][1] * cache[cx][cy];
    new_val += filter[1][2] * cache[cx][cy + 1];
    new_val += filter[2][0] * cache[cx + 1][cy - 1];
    new_val += filter[2][1] * cache[cx + 1][cy];
    new_val += filter[2][2] * cache[cx + 1][cy + 1];
    output[tx * cols + ty] = new_val;
  }
end
```

rows: görüntünün satır sayısı, cols: görüntünün sütun sayısı, input: girdi görüntüsü, output: çıktı görüntüsü, filter: filtre matrisi, __syncthreads(): bölüt içerisindeki tüm iş parçacıklarının eşzamanlı olmasını sağlayan işlev.

2.4.4 İş Parçacığı Kalınlaştırma

İş parçacığı kalınlaştırma (kalınlaştırma), birkaç iş parçacığının yaptığı işi, tek bir iş parçacığı yapacak şekilde iş parçacığı buyruklarını yeniden düzenlemektir. Başka bir deyişle, aynı işlemi daha az iş parçacığı ile yapmaktır. Böylelikle daha önce her bir iş parçacığı tarafından yapılan birtakım gereksiz işlemler (dallanma, aritmetik vb.) azaltılabilir (Magni *et al.* 2013) ve ortak işlemler için yazmaçlar yeniden kullanılabilir (Yang *et al.* 2012).

Şekil 3'te görüldüğü üzere ardışık imgecikler üzerinde konvolüsyon uygulandığında birtakım imgeciklerin örtüştüğü görülmektedir. Bu durumda, filtre matrisinin ve örtüşen imgeciklerin yeniden kullanımı sağlamak amacıyla kalınlaştırma uygulanabilir. Böylelikle, örtüşen veriler için bellek erişimlerinin azalmasıyla başarım artışı sağlanabilir.



Şekil 3. Ardışık Veriler Üzerinde Konvolüsyon

Algoritma 3'te temel çekirdeğin yatay eksende iki kat kalınlaştırma ile güncellenmiş sürümü gösterilmiştir.

Algoritma 3: İş Parçacığı Yükünün Artırılması

```
Input: int rows, int cols, unsigned char* input, unsigned char* output, float filter[3][3]
begin
  int ty = (blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x) * 2;
  int tx = blockIdx.y * blockDim.y + threadIdx.y;
  int new_val = 0;
  unsigned char frame[3][3];
  if ((tx > 0 && tx < rows - 1) && (ty > 0 && ty < cols - 1)) {
    frame[0][0] = input[(tx - 1) * cols + ty - 1];
    frame[0][1] = input[(tx - 1) * cols + ty];
    frame[0][2] = input[(tx - 1) * cols + ty + 1];
    frame[1][0] = input[tx * cols + ty - 1];
    frame[1][1] = input[tx * cols + ty];
    frame[1][2] = input[tx * cols + ty + 1];
    frame[2][0] = input[(tx + 1) * cols + ty - 1];
    frame[2][1] = input[(tx + 1) * cols + ty];
    frame[2][2] = input[(tx + 1) * cols + ty + 1];
```

```
    new_val += filter[0][0] * frame[0][0];
    new_val += filter[0][1] * frame[0][1];
    new_val += filter[0][2] * frame[0][2];
    new_val += filter[1][0] * frame[1][0];
    new_val += filter[1][1] * frame[1][1];
    new_val += filter[1][2] * frame[1][2];
    new_val += filter[2][0] * frame[2][0];
    new_val += filter[2][1] * frame[2][1];
    new_val += filter[2][2] * frame[2][2];
    output[(tx * cols + ty)] = new_val >> 4;
    for (int i = 1; i < 2; i++) {
      int _ty = ty + i;
      shift_left(frame);
      if (_ty < cols – 1) {
        frame[0][2] = input[(tx - 1) * cols + _ty + 1];
        frame[1][2] = input[tx * cols + _ty + 1];
        frame[2][2] = input[(tx + 1) * cols + _ty + 1];
        new_val += filter[0][0] * frame[0][0];
        new_val += filter[0][1] * frame[0][1];
        new_val += filter[0][2] * frame[0][2];
        new_val += filter[1][0] * frame[1][0];
        new_val += filter[1][1] * frame[1][1];
        new_val += filter[1][2] * frame[1][2];
        new_val += filter[2][0] * frame[2][0];
        new_val += filter[2][1] * frame[2][1];
        new_val += filter[2][2] * frame[2][2];
        output[(tx * cols + _ty)] = new_val;
      }
    }
  }
end
```

rows: görüntünün satır sayısı, cols: görüntünün sütun sayısı, input: girdi görüntüsü, output: çıktı görüntüsü, filter: filtre matrisi, frame: konvolüsyon için kullanılacak imgecik kümesi, shift_left(): matris sütunlarını bir birim sola kaydıran işlev.

2.4.5 Vektörleştirme

Vektörleştirme, skalar değişkenler (int, float vb.) yerine daha büyük veri yapıları olan vektörlerin (int2, float4 vb.) kullanılmasıdır. Vektör veri yapıları en yaygın olarak erişimlerin sayısını azaltmak (Braak *et al.* 2010, Chakrabarti *et al.* 2012) ve bant genişliğini (Choi *et al.* 2010) artırmak için bellek erişimlerinde kullanılmaktadır. Örnek olarak, bir iş parçacığı sıralı bellek konumlarından 4 kez unsigned char (1 byte) tipinde bir veri okuyorsa bu erişimler bir CUDA vektör değişkeni olan uchar4'e (4 byte) toplanıp tek bir bellek erişimi ile gerçekleştirilebilir. Böylece, aynı veri daha az buyruk ile erişilebilir.

Kalınlaştırılmış bir iş parçacığı tarafından gerçekleştirilen konvolüsyon işlemi düşünüldüğünde bellek erişimlerinin sırasız olmasından dolayı girdi imgeciklerinin okunması sırasında vektörleştirilmiş bellek erişimi gerçekleştirmek olası değildir. Ancak, çıktı imgecikleri sıralı bellek konumlarına yazılacağı için vektör veri yapıları kullanılabilir. Böylelikle, çıktı değerlerinin yazılması, daha az sayıda buyruk ile gerçekleştirilebilir.

3. Bulgular

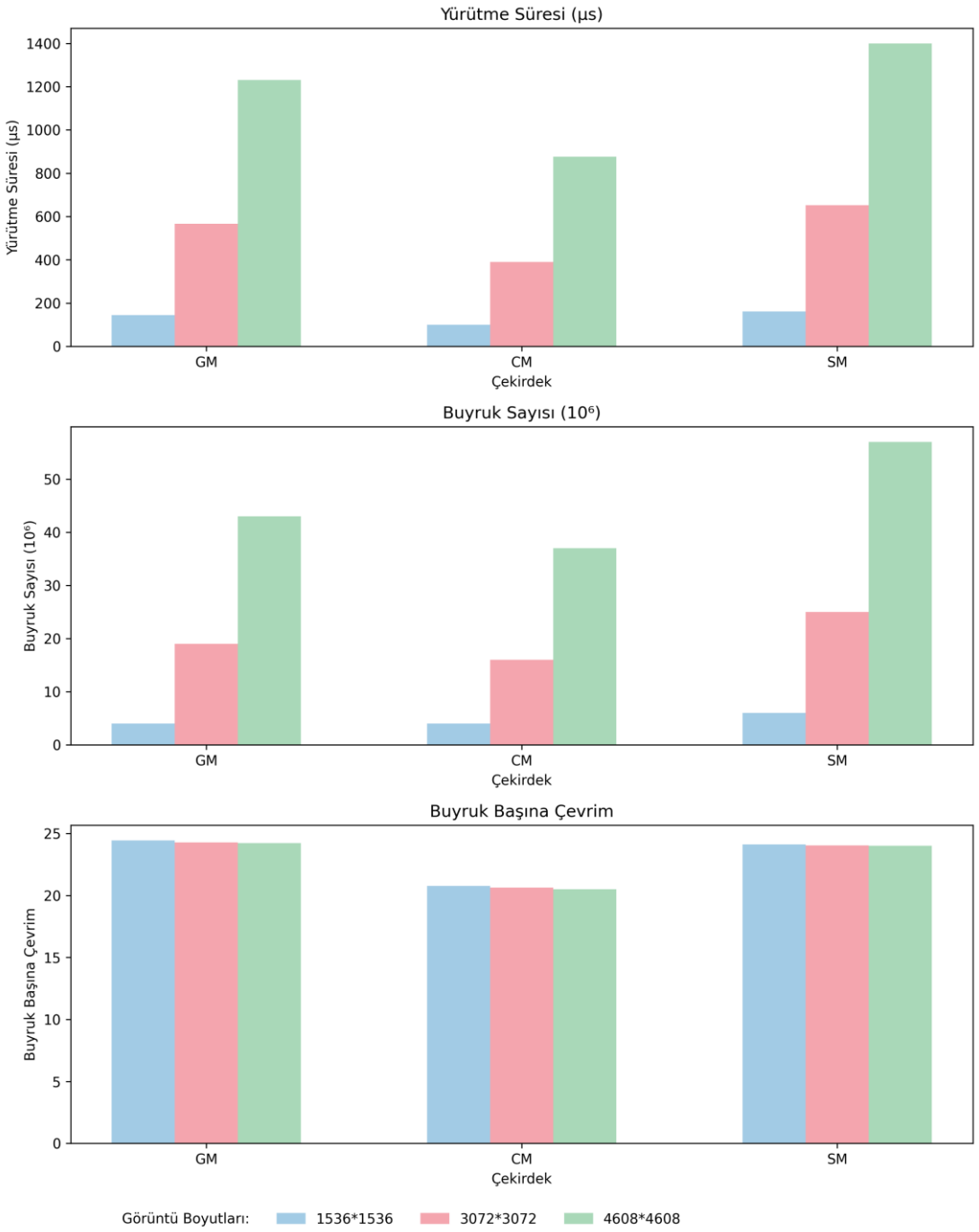
Çalışma kapsamında tasarlanan çekirdekler Çizelge 1'deki gibi isimlendirilmiştir. Bu çekirdekler, Windows 11 işletim sisteminde Çizelge 2'deki donanım üzerinde CUDA 12.6, OpenCV 4.10.0 ve ArrayFire 3.9.0 sürümleri ile çalıştırılmıştır. Çekirdeklere ait bulguların elde edilmesinde Nsight Compute (İnt. Kyn-4) aracı kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çekirdeklerin İsimlendirilmesi

Çekirdek	Anlamı
GM	Filtre matrisinin evrensel bellekte saklandığı, bellek erişimlerinin skalar veriler ile gerçekleştirildiği çekirdek
CM	Filtre matrisinin sabit bellekte saklandığı, bellek erişimlerinin skalar veriler ile gerçekleştirildiği çekirdek
SM	İlgili verilerin paylaşımlı belleğe getirildiği, bellek erişimlerinin skalar veriler ile gerçekleştirildiği çekirdek
GM_CF8	GM çekirdeğinin 8 kat kalınlaştırıldığı çekirdek
GM_CF8_Vec	GM çekirdeğinin 8 kat kalınlaştırıldığı, çıktı görüntüsünün vektörler ile yazıldığı çekirdek
SM_CF12_Vec	SM çekirdeğinin 12 kat kalınlaştırıldığı, çıktı görüntüsünün ve paylaşımlı belleğe getirilen verilerin vektörler ile yazıldığı çekirdek
...	...

Çizelge 2. GTX 1660 TI (TU116) Donanımı İçin Teknik Özellikler

Özellik	Değer
Hesaplama Yeteneği	7.5
Bellek Saat Sıklığı	6001 MHz
GPU Saat Sıklığı	1590 MHz
Evrensel Bellek Boyutu	6442 MB
Bellek Veriyolu Genişliği	192-bit
L2 Önbellek Boyutu	1572864 byte
SM Sayısı	24
SM Başına En Fazla İş Parçacığı	1024
SM Başına En Fazla Bölüt	16
SM Başına En Fazla Çözgü	32
SM Başına Yazmaç	65536
SM Başına Paylaşımlı Bellek	65536 byte

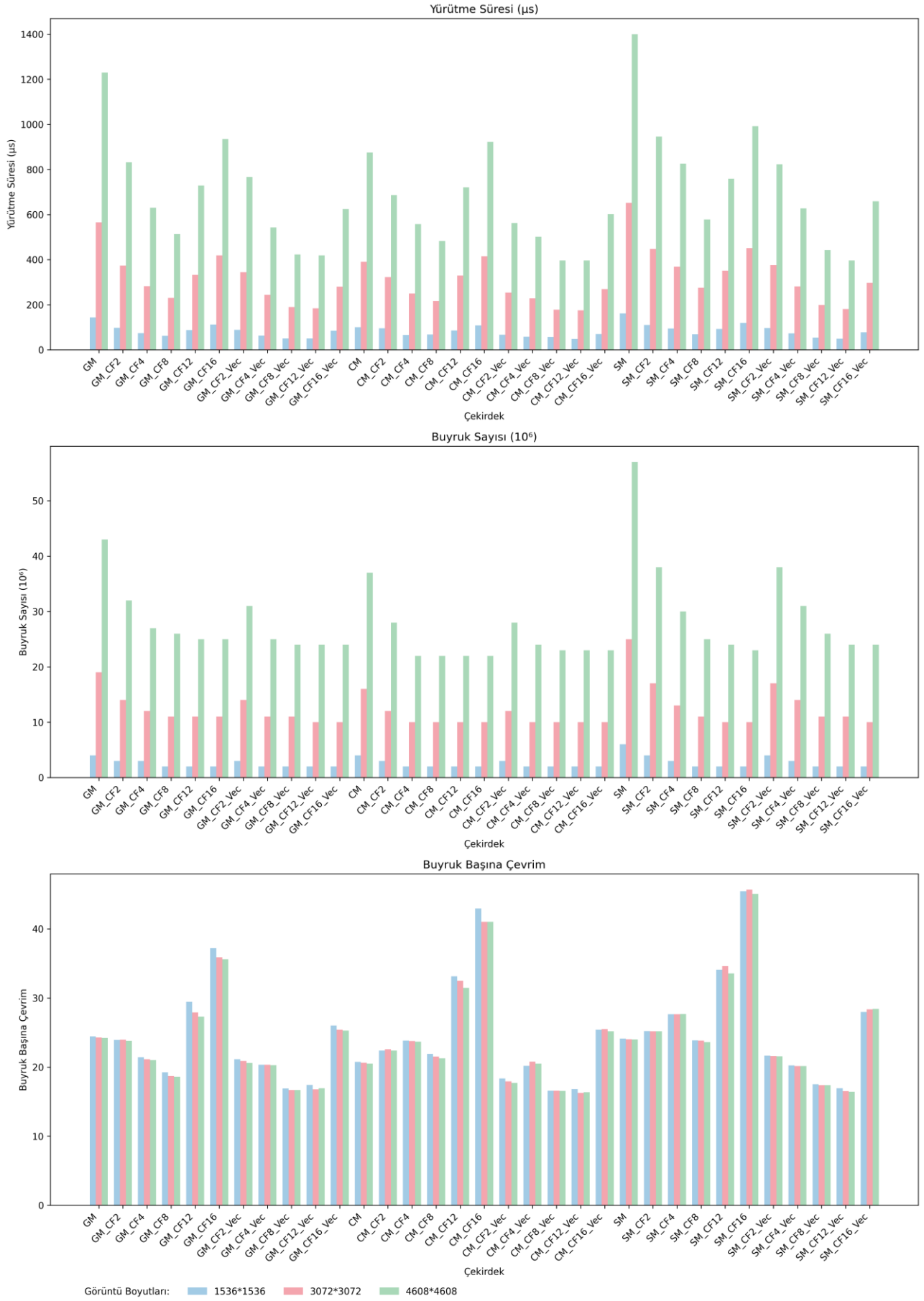


Şekil 4. Temel Çekirdeklerin Özellikleri

Çizelge 3. Çekirdeklerin Karşılaştırılması (3072*3072 Görüntü Boyutu İçin)

Ölçüt	GM	CM	SM
Yürütme Süresi (µs)	565,54	390,11	652,13
Toplam Buyruk Sayısı	19.464.192	16.515.072	25.657.344
Bellek Buyrukları	LDG: 5.308.416 STG: 294.912	LDG: 2.654.208 STG: 294.912	LDG: 3.610.752 STG: 294.912 LDS: 2.604.208 STS: 1.474.560
LDG Başına Bellek Sektörü	1,83	2,66	1,24
Buyruk Başına Ortalama Çevrim	24,28	20,63	24,02

LDG: Load From Global, STG: Store to Global, LDS: Load From Shared, STS: Store to Shared.



Şekil 5. Kalınlaştırma ve Vektörleştirmenin Etkisi

Çizelge 4. Kalınlaştırmanın Etkisi (3072*3072 Görüntü Boyutu İçin)

Çekirdek	Ölçüt	CF = 2	CF = 4	CF = 8	CF = 12	CF = 16
GM	Yürütme Süresi (µs)	373,66	282,30	230,27	331,94	418,82
	Evrensel Bellekten Yükleme Buyruğu (LDG)	3.096.576	1.990.656	1.437.696	1.253.376	1.161.216
	LDG Başına Bellek Sektörü	2,14	3,43	6,68	10,27	14,01
CM	Yürütme Süresi (µs)	322,85	249,86	216,80	329,76	415,17
	Evrensel Bellekten Yükleme Buyruğu (LDG)	1.769.472	1.327.104	1.105.920	1.032.192	995.328
	LDG Başına Bellek Sektörü	2,99	4,65	8,38	12,26	16,18
SM	Yürütme Süresi (µs)	447,10	369,15	275,62	350,98	451,33
	Evrensel Bellekten Yükleme Buyruğu (LDG)	1.990.272	1.179.264	773.760	638.592	571.008
	LDG Başına Bellek Sektörü	1,29	1,94	4,05	6,73	9,71

LDG: Load From Global, CF (Kalınlaştırma Faktörü): iş parçacığı başına iş yükü.

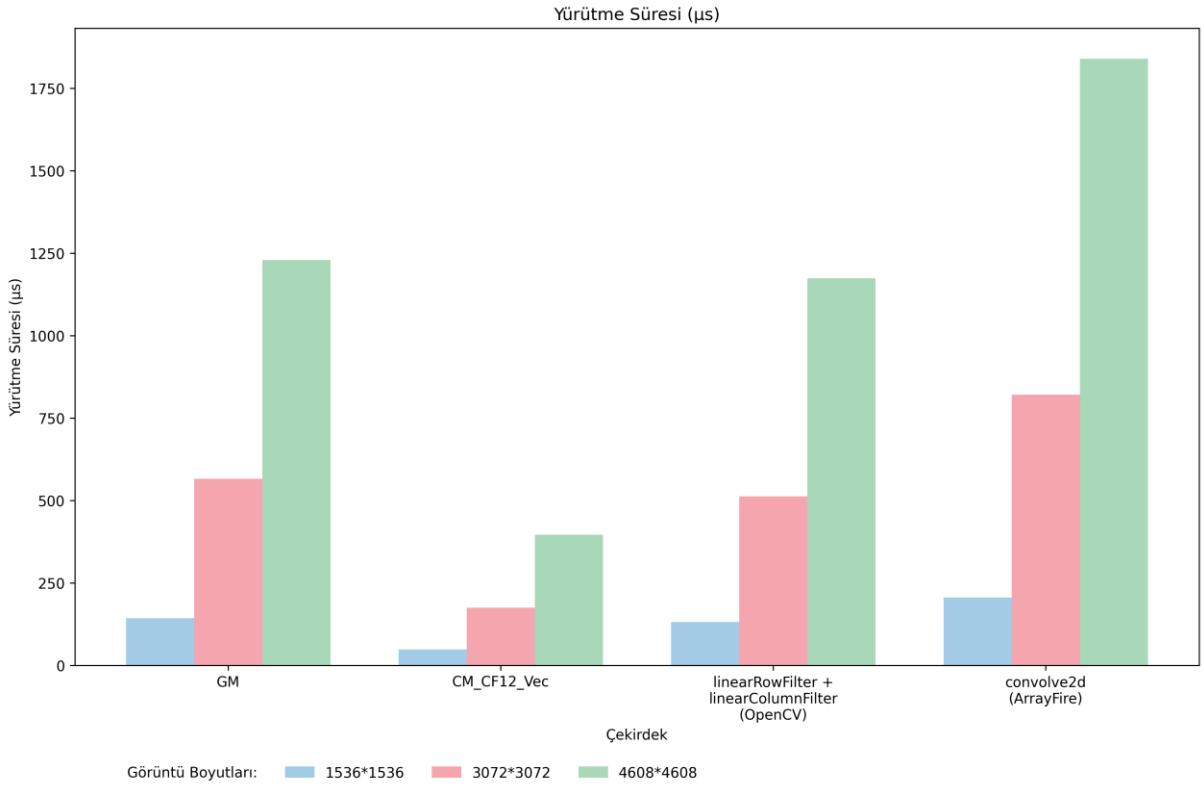
Çizelge 5. Vektörleştirmenin Etkisi (3072*3072 Görüntü Boyutu İçin)

Çekirdek	Ölçüt	CF = 2	CF = 4	CF = 8	CF = 12	CF = 16
GM_Vec	Yürütme Süresi (µs)	344,67	243,68	189,79	184,16	279,97
	Evrensel Belleğe Yazma Buyruğu (STG)	147.456	73.728	73.728	73.728	73.728
	STG Başına Bellek Sektörü	2,00	4,00	7,99	11,99	15,99
CM_Vec	Yürütme Süresi (µs)	254,24	227,87	178,53	175,23	269,89
	Evrensel Belleğe Yazma Buyruğu (STG)	147.456	73.728	73.728	73.728	73.728
	STG Başına Bellek Sektörü	2,00	4,00	7,99	11,99	15,99
SM_Vec	Yürütme Süresi (µs)	375,74	280,80	198,88	180,74	296,64
	Evrensel Belleğe Yazma Buyruğu (STG)	147.456	73.728	73.728	73.728	73.728
	STG Başına Bellek Sektörü	2,00	4,00	7,99	11,99	15,99

LDG: Load From Global, CF (Kalınlaştırma Faktörü): iş parçacığı başına iş yükü.

Çizelge 6. Literatürdeki Çalışmaların Karşılaştırılması

Çalışma	Yöntemler/Öneriler	Elde Edilen Başarım
Werkhoven vd. (2011)	- Filtre matrisini sabit bellekte depolama - Görüntüyü paylaşımlı belleğe kopyalama - İş parçacığı başına uyarlamalı iş yükü (adaptive tiling)	4,73 kata kadar hızlanma; uyarlı iş yükü artırımı ile %37 verim artışı
Iandola vd. (2013)	- İş parçacığı başına daha fazla iş yükü (loop unrolling) - Veriyi önceden getirme (prefetching)	ArrayFire kütüphane işlevine göre 1,2x ile 4,5x arasında değişken hızlanma
Chen vd. (2017)	- Filtre matrisini sabit bellekte depolama - Görüntüyü paylaşımlı belleğe kopyalama - İş parçacığı başına daha fazla iş yükü	1x1 filtre matrisi boyutunda cuDNN'e göre 6,16x; 3x3 boyutunda 6,43x; 5x5 boyutunda 2,90x hızlanma
Lu vd. (2020)	- Yatay eksende çözgü karıştırma (warp shuffle) - Dikey eksende örtüşen satırları birden fazla çıktı için hesaplama	ArrayFire, NPP ve cuDNN kütüphane işlevlerine kıyasla 2 kattan daha fazla hızlanma
Topçu ve Öz (2022)	- Filtre matrisini sabit bellekte depolama - Görüntüyü paylaşımlı belleğe kopyalama - CPU-GPU arası asenkron veri aktarımı (CUDA stream)	1,6 kata kadar hızlanma
Bu çalışma (2024)	- Filtre matrisini sabit bellekte depolama - Görüntüyü paylaşımlı belleğe kopyalama - İş parçacığı başına daha fazla iş yükü - Bellek erişimlerinin vektörleştirilmesi	3,22 kata kadar hızlanma, OpenCV kütüphane işlevine göre 2,72-2,96, ArrayFire kütüphane işlevine göre 4.23- 4.68 kat arasında değişken hızlanma



Şekil 6. Uygulanan Yöntemin ArrayFire ve OpenCV Kütüphane İşlevleri ile Karşılaştırılması

Çizelge 3 ve Şekil 4 incelendiğinde, filtre matrisinin sabit bellekte saklanmasının (CM), verilerin doğrudan kullanılabilirliğini sağlayarak (yazmaca taşınmadan) toplam buyruk sayısını azalttığı görülmüştür (19.464.192'den 16.515.072'ye). Bu yöntemde, filtre matrisi için artık evrensel bellek erişimleri yapılmadığından dolayı evrensel bellek erişimlerinin sayısı %50 oranında azalmıştır (LDG: 5.308.416'dan 2.654.208'e). Öte yandan, görüntü bölümlerinin paylaşımlı belleğe taşınması (SM), paylaşımlı belleğe yapılan okuma ve yazma işlemleri (LDS, STS) nedeniyle toplam buyruk sayısını artırmıştır (19.464.192'den 25.657.344'e). Bu yöntemde, örtüşen veriler paylaşımlı bellek üzerinden okunacağı için evrensel bellek erişimlerinin sayısı azalmıştır (LDG: 5.308.416'dan 3.610.752'ye).

Kalınlaştırma işlemi (Çizelge 4 ve Şekil 5), filtre matrisi verilerinin yeniden kullanımını sağlayarak ve örtüşen verilere yönelik bellek erişimlerini azaltarak evrensel bellek yüklemelerini önemli ölçüde azaltmıştır (LDG: 5.308.416'dan 1.161.216'ya). Ancak, kalınlaştırılmış iş parçacıklarının bellek erişimlerinin daha fazla bellek bölgesine dağılmasından dolayı birim erişim yükü artmıştır (LDG Başına Bellek Sektörü: 2,14'ten 14,01'e). Ayrıca, çıktı verilerinin ardışık bellek konumlarına yazılması sırasında vektör veri yapılarının kullanılması (Çizelge 5), belleğe yazma buyruklarını %75 oranında azaltmıştır (STG: 294.912'den 73.728'e) .

Uygulanan yöntemler, bilindik kütüphane işlevleri ile kıyaslandığında (Şekil 6) temel yöntemin (GM) OpenCV kütüphanesi işlevi ile yakın sonuçlar ürettiği ve uygulanan eniyileme yöntemlerinin (CM_CF12_Vec) yürütme süresini olumlu yönde büyük oranda etkilediği görülmüştür. Bunun yanı sıra, hem önerilen yöntemin hem de OpenCV kütüphane işlevinin ArrayFire kütüphane işlevine göre büyük oranda daha hızlı olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Sonuç olarak, yürütme sırasında değişmez olarak nitelendirilebilecek verilerin sabit bellek aracılığıyla dağıtılmasının yalnızca evrensel bellek erişimlerini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda adres işlemlerinde kolaylık sağlayarak buyruk sayısını azalttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, örtüşen verilerin paylaşımlı belleğe getirilmesinin, tekrarlayan evrensel bellek erişimlerini azalttığı görülmüştür. Ancak, verilerin paylaşımlı belleğe getirilmesindeki gecikmenin başarım artışını kısmen gölgelediği görülmüştür. Kalınlaştırmanın, verilerin yeniden kullanımını sağlayarak toplam bellek erişim sayısını önemli ölçüde azalttığı, ancak bellek erişimlerinin daha çok bellek bölgesine yayılması nedeniyle birim erişim başına düşen yükü artırdığı görülmüştür. Bu durum, kalınlaştırma işlemindeki sınırlayıcı etken olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, kalınlaştırmanın etkisiyle iş parçacıklarının bellekte sıralı konumlara eriştiği durumlarda, bellek erişimlerinin vektör veri yapıları ile

gerçekleştirilmesinin başarımı artırdığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında eniyileme yaklaşımı olarak belirtilen yöntemler, yürütme süresine etkileri açısından değerlendirilmiştir. Öte yandan, GPU'ların göreceli olarak yüksek güç tüketmeleri ve güç kısıtlı sistemlerde yaygın olarak kullanılması nedeniyle, bu yöntemlerin güç tüketimi üzerindeki etkileri de ayrıca incelenmesi gereken bir konudur. Gelecek çalışmalarda bu çalışmada uygulanan yöntemlerin güç tüketimi üzerindeki etkisinin incelenmesi düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma, Görselleştirme – orijinal taslak
Yazar 2: Danışmanlık, Biçimsel analiz– orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Aamodt, T.M., Fung, W.W.L., Rogers, T.G. and Martonosi, M., 2018. General-purpose Graphics Processor Architectures. Morgan & Claypool Publishers.

Brodtkorb, A.R., Hagen, T.R., Schulz, C. and Hasle, G., 2013. GPU Computing in discrete optimization. Part I: Introduction to the GPU. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2, **1-2**, 129-157. https://doi.org/10.1007/s13676-013-0025-1

Brodtkorb, A.R., Hagen, T.R. and Sætra, M.L., 2013. Graphics processing unit (GPU) programming strategies and trends in GPU computing. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73, **1**, 4-13. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.04.003

Chakrabarti, G., Grover, V., Aarts, B., Kong, X., Kudlur, M., Lin, Y., Marathe, J., Murphy, M. and Wang, J. Z., 2012. CUDA: Compiling and optimizing for a GPU platform. *Procedia Computer Science*, 9, 1910-1919. https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.04.209

Chen, X., Chen, J., Chen, D.Z. and Hu, X.S., 2017. Optimizing memory efficiency for convolution kernels on Kepler GPUs. *54th Annual Design Automation Conference 2017*. Texas, United States, 1-6. https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.10591

Choi, J. W., Singh, A. and Vuduc, R.W., 2010. Model-driven autotuning of sparse matrix-vector multiply on GPUs. *ACM sigplan notices*, *45,* **5**, 115-126. https://doi.org/10.1145/1837853.1693471

Hijma, P., Heldens, S., Sclocco, A., Van Werkhoven, B. and Bal, H.E., 2023. Optimization techniques for GPU programming. *ACM Computing Surveys*, *55,* **11**, 1-81. https://doi.org/10.1145/3570638

Iandola, F.N., Sheffield, D., Anderson, M.J., Phothilimthana, P.M., and Keutzer, K., 2013. Communication-minimizing 2D convolution in GPU registers. *2013 IEEE International Conference on Image Processing*. Melbourne, Australia, 2116-2120. https://doi.org/10.1109/ICIP.2013.6738436

Kalaiselvi, T., Sriramakrishnan, P. and Somasundaram, K., 2017. Survey of using GPU CUDA programming model in medical image analysis. *Informatics in Medicine Unlocked*, *9*, 133-144. https://doi.org/10.1016/j.imu.2017.08.001

Kirk, D.B. and Wen-Mei, W.H., 2016. Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach. Morgan Kaufmann.

Lu, G., Zhang, W. and Wang, Z., 2020. *Optimizing GPU memory transactions for convolution operations*. 2020 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER). Kobe, Japan, 399-403. https://doi.org/10.1109/CLUSTER49012.2020.00050

Magni, A., Dubach, C. and O'Boyle, M.F., 2013. A large-scale cross-architecture evaluation of thread-coarsening. *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis.* Colorado, United States, 1-11. https://doi.org/10.1145/2503210.2503268

Topçu, B. and Öz, I., 2022. *Performance Evaluation of CUDA Optimizations for Convolution Operations.* Yüksek Başarımlı Hesaplama Konferansı (BAŞARIM) 2022. İstanbul, Turkey, 37.

Sanders, J. and Kandrot, E., 2010. CUDA by example: an introduction to general-purpose GPU programming. Addison-Wesley Professional.

Smith, S.W., 1997. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Pub.

van den Braak, G. J., Mesman, B. and Corporaal, H. 2010. Compile-time GPU memory access optimizations. *2010 International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling and Simulation*. Samos, Greece, 200-207. https://doi.org/10.1109/ICSAMOS.2010.5642066

Van Werkhoven, B., Maassen, J., and Seinstra, F.J. 2011. Optimizing convolution operations in cuda with adaptive tiling. *A4MMC'11: Proc. Workshop on Applications for Multi and Many Core Processors*. California, United States. https://doi.org/10.1016/j.future.2013.09.003

Yang, Y., Xiang, P., Kong, J., Mantor, M. and Zhou, H., 2012. A unified optimizing compiler framework for different GPGPU architectures. *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization (TACO)*, *9,* **2**, 1-33. https://doi.org/10.1145/2207222.2207225

İnternet kaynakları

1-Ludwig, J., Image Convolution, https://web.pdx.edu/~jduh/courses/Archive/geog481w07/Students/Ludwig_ImageConvolution.pdf, (24.01.2025)

2- O'Shea, K., An Introduction to Convolutional Neural Networks, https://arxiv.org/abs/1511.08458, (24.01.2025)

3- Podlozhnyuk, Victor., Image Convolution with CUDA, https://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/1.1-Beta/x86_64_website/projects/convolutionSeparable/doc/convolutionSeparable.pdf, (24.01.2025)

4- The User Guide for Nsight Compute, https://docs.nvidia.com/nsight-compute/NsightCompute, (24.01.2025)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1551996
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045202 (816-826)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045202 (816-826)

PCB Üretiminde Çok Sınıflı Kusur Tespiti için YOLO Tabanlı Derin Öğrenme Modeli

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 18.09.2024
Kabul/Accepted: 05.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

YOLO-Based Deep Learning Model for Multi-Class Defect Detection in the PCB Manufacturing

İzemnur BUDAK[1*], Sezen BAL[2], Hayriye KORKMAZ[1]

[1] *Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*
[2] *Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, PCB üretim sürecinde karşılaşılan olası kusurları otomatik olarak tespit ederek insan kaynaklı hataları en aza indirmeyi ve üretim sürecini hızlandırmayı amaçlayan; görüntü işleme tekniklerini ve derin öğrenme algoritmalarını kullanan bir kusur tespit ve sınıflandırma yöntemi önerilmiştir. Özellikle PCB üretim hattında böyle derin öğrenme tabanlı bir sistemin uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve bu doğrultuda gerçek zamanlı bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı kusur türlerini içeren görüntülerden oluşan açık kaynaklı DeepPCB veri seti içinde yer alan 1194 PCB görüntüsü kullanılmıştır. Veri setinde yer alan görüntüler üzerinde toplam 7897 kusur etiketlenmiş ve bunlardan 6385 adedi (%80) eğitim, 1512 (%20) adedi ise test için ayrılmıştır. Eğitim ve test setleri, sınıflar arasında dengeli bir dağılım olacak şekilde rastgele bölünmüştür. Kusurlar, Make Sense yazılımı kullanılarak etiketlenmiş ve bu süreçte altı farklı kusur türü tanımlanmıştır. Etiketleme işlemi, modelin eğitim aşamasında yüksek doğruluk elde edilmesinde kritik bir adım olarak değerlendirilmiştir. YOLOv4 algoritmasıyla eğitilen model, mAP@50 değeri %64,1 olarak hesaplanmıştır. Daha güncel bir algoritma olan YOLOv8 kullanılarak eğitilen modelde ise mAP@50 değeri %93,5'e ulaşmıştır. Bu sonuçlar, YOLOv8 algoritmasının, PCB üretim hatlarında yüksek doğruluk oranı ve daha az hata ile uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Diğer taraftan bu modellerde, YOLOv4 ve v8'in varsayılan standart parametreleri kullanılmıştır. Ancak literatür taraması yapıldığında bu parametrelerin optimize edilmesinin daha yüksek performans elde edilmesinde önemli bir payı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *PCB; Kusur Tespiti; Görüntü İşleme; Derin Öğrenme; Gerçek Zamanlı Uygulama; Üretim Hattı Otomasyonu*

Abstract

In this study, a defect detection and classification method using image processing techniques and deep learning algorithms is proposed, which aims to minimize human-induced errors and speed up the production process by automatically detecting possible defects encountered in the PCB production process. In particular, the applicability of such a deep learning-based system in the PCB production line was evaluated and a real-time simulation was performed in this direction. In this study, 1194 PCB images were used in the open-source DeepPCBdataset, which consists of images containing different types of defects. A total of 7897 defects were labeled on the images in the data set, of which 6385 (80%) were reserved for training and 1512 (20%) for testing. The training and test sets were randomly divided to provide a balanced distribution among the classes. Defects were labeled using Make Sense software and six different defect types were identified during this process. The labeling process was considered a critical step in achieving high accuracy during the training phase of the model. The model trained with the YOLOv4 algorithm had a mAP@50 value of 64.1%. In the model trained using YOLOv8, a more up-to-date algorithm, the mAP@50 value reached 93.5%. These results show that the YOLOv8 algorithm offers a viable solution with high accuracy and fewer errors in PCB production lines. On the other hand, the default standard parameters of YOLOv4 and v8 were used in these models. However, when the literature was reviewed, it was seen that optimizing these parameters had an important share in achieving higher performance.

Keywords*: PCB; Defect Detection; Image Processing; Deep Learning; Real-Time Application; Manufacturing Line Automation*

1. Giriş

Baskılı Devre Kartları (PCB'ler), elektronik endüstrisinde onlarca yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelecekte de kullanımı gittikçe artacak olan elektronik cihazların performansı PCB'nin tasarımına ve üretim süreci kalitesine bağlıdır. PCB üretim süreci, tasarımın karmaşıklığına bağlı olarak çeşitli kusurlara açıktır. Bu kusurlar bakır yolların plaka üzerinde aşındırma sürecinde olabileceği gibi, plaka üretimi tamamlandıktan sonra dizgi sürecinde de gözlemlenebilmektedir. Bu sebeple PCB üretim kusurları iki grup altında incelenebilir: 1) Plaka üretimi sırasındaki Kısa Devre, Açık Devre, Aşırı Aşındırma, Yetersiz Aşındırma, Sahte Bakır Parçalar, Delik Hatlar gibi kusurlar ve 2) Dizgi montaj hattında bileşenlerin yanlış yerleştirilmesi, istenmeyen lehim köprülerinin oluşumu gibi kusurlar. Geleneksel yöntemlerde, uzman operatörler

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İzemnur BUDAK e-posta/e-mail: izemnur.budak@marmara.edu.tr

çıplak gözle veya mikroskop kullanarak bu kusurları tespit ederler; ancak bu yöntemler uzun zaman almasından dolayı seri üretim hatları için uygun değildir. Ayrıca operatörün kusurları gözden kaçırma olasılığı da yüksektir. Bu kusurların tespit edilememesi kalite sorunlarına, sürecin uzunluğu ise maaliyet sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, PCB üretim sürecinde görüntü işleme yöntemlerinin kullanılmasıyla hızlı ve güvenilir kusur tespit uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Yüksek çözünürlüklü kameralar, gelişmiş görüntü işleme algoritmaları ve derin öğrenme modellerini kullanan bir otomatik tespit sürecinin PCB plaka üretim hattına eklenmesi, insan kaynaklı hataları azaltırken süreci otonom hale getirerek hızlandırma potansiyeline sahiptir (Zhang ve Liu 2021, Subramanyam vd. 2022, Luo vd. 2021, Du vd. 2024).

PCB plaka üretim sürecinde, plaka üzerinde iç katman tasarımının işlenmesi sonrası, dış katman tasarımının işlenmesi sonrası ve PCB aşındırma işlemi sonrasında olmak üzere her 3 denetim noktasında bu uygulama kullanılabilir. Kusurlar üretim sürecindeki aşamalara göre farklılık gösterebilmektedir. Bu kusurların tespiti için her aşama için ayrı modeller oluşturulabilir ya da tüm aşamaları kapsayacak tek bir model de kullanılabilir. Bu çalışmada oluşturulan model, kullanılan veri setindeki görüntüler tüm aşamaları kapsadığından 3 denetim noktasında da uygulanabilir. PCB plakalarının üretimi sırasında ortaya çıkan kusurların otomatik olarak tespit edilmesi ve sınıflandırılmasına yönelik çalışmada dört aşamalı bir süreç izlenmiştir:

1) Kusur özelliklerinin çıkarılması ve kategorize edilmesi
2) Veri seti hazırlanması
3) Seçilen 2 farklı versiyona sahip YOLO algoritmasıyla derin öğrenme modellerinin oluşturulması
4) Gerçek zamanlı simülasyonun gerçekleştirilmesi

Bu çalışma için literatür taraması, Web of Science veritabanı kullanılarak "PCB" ve "deep learning" anahtar kelimeleri ile yapılmıştır. 2021 ve sonrası için yapılan ilk taramada toplam 174 çalışma incelenmiştir. Daha detaylı bir tarama ise "object detection", "defect detection", "deep learning" ve "PCB" anahtar kelimeleri kullanılarak yapılmış ve 25 adet ilgili çalışma bulunmuştur. PCB yüzey kusurlarını tespit eden Sezer ve Altan (2021), Adibhatla vd. (2021), Lin vd. (2022) çalışmaları incelenmiştir. Xie ve arkadaşları bu çalışmada da kullanılan DeepPCB veri seti ve buna ilave olarak ayrıca NEU-DET veri seti üzerinde YOLOv4 ve FE-YOLO modelleri ile PCB kusur tespit çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada DeepPCB veri seti üzerinde YOLOv4 algoritması ile mAP@50 değeri 98,5 olarak elde edilmiştir. (Xie vd. 2023).

Kim ve arkadaşları, atlamalı bağlantılı konvolüsyonel otoenkoder (autoencoder) modeline dayanan bir PCB kusur tespit modeli önermişlerdir. PCB görüntülerini kusurlu veya kusursuz şeklinde sınıflandırmışlar ve %98,08 doğruluk elde etmişlerdir (Kim vd. 2021).

Başka bir çalışmada, PCB yüzeyi tek sınıf tekli kusur tespiti için YOLOv4-MN3 modeli kullanılarak %98,64 mAP değeri ile yüksek bir doğruluk oranı sağlandığı bildirilmiştir (Liao vd. 2021).

Yue Zhang ve arkadaşları PCB üzerinde çok sınıf-çoklu kusur tespiti yapmak için Faster R-CNN, YOLOv3, YOLOv3-Tiny ve kendi oluşturdukları metot ile derin öğrenme modeli oluşturmuştur. Çalıştıkları modellerden en yüksek mAP değerini Faster R-CNN modelinden 49,50 olarak elde etmiştir (Zhang vd. 2021).

Ding ve arkadaşları, baskılı devre kartlarının kalite kontrolünü iyileştirmek amacıyla önerdikleri Tiny Defect Detection (TDD) ağı olan TDD-Net'in, PCB hata veri seti üzerinde yapılan nicel sonuçlarda tekli sınıf çok kusurlu hata tespitinde %98,90 mAP değerine ulaşmışlardır (Ding vd. 2019).

Wang ve arkadaşları, karmaşık arka planlar, küçük kusurlar ve düzensiz şekiller gibi PCB hata görüntülerinde sıkça karşılaşılan zorluklara yanıt olarak, yüzey kusurlarını tespit etme yeteneğini artırmak amacıyla geliştirdikleri YOLO-Biformer modelini tanıtmışlardır (Wang vd. 2024).

Ayrıca WOS veri tabanında “PCB” anahtar kelimesi olmadan filtreleme yapıldığında derin öğrenme tabanlı kusur tespitine yönelik farklı çalışmalar da bulunmaktadır. Zhang ve arkadaşları, deri yüzeyindeki çoklu-sınıf kusurların tespiti için YOLO tabanlı bir model kullanarak %52,3 mAP, %58,2 doğruluk ve %68,7 duyarlılık oranına ulaşmışlardır (Chen vd. 2024).

Liu ve arkadaşları, yüzey kusuru tespiti için YOLOv4 tabanlı Mixed YOLOv4-LITEv1, Mixed YOLOv4-LITEv2 ve Mixed YOLOv4-LITEv3 modellerini kullanarak sırasıyla %79,01, %81,89, %80,17 ve %78,60 mAP değerlerine ulaşmışlardır. Ayrıca bu sonuçlar, Mixed YOLOv4-LITEv3 modelinin sadece tek yüzey kusurlarını değil, aynı zamanda çoklu sınıf kusurlarını da eşzamanlı olarak tespit edebildiğini göstermektedir (Liu vd. 2023).

Li ve arkadaşları, bilgisayar anakart montajının kalite denetiminde otomasyon ve zekanın artırılmasına yönelik olarak, çok ölçekli özellikler ve dikkat mekanizmalarını entegre eden RetinaNet tabanlı geliştirilmiş bir hata tespit yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, deneysel doğrulamalar sonucunda, bilgisayar anakartı montaj hatalarını tespit etmek için %84,5 ortalama tespit

doğruluğu sağlamıştır (Li vd. 2023). Literatürde PCB üzerindeki veya başka nesnelerdeki kusur tespitine yönelik çalışmalar incelendiğinde bir görselde yer alabilecek sınıf sayısı ile bir sınıfa ait kusur miktarını açıklayan veri seti sınıf-kusur matrisi Çizelge 1'de oluşturulmuştur. PCB kusur tespiti uygulamaları, dört ana kategori altında toplanabilir: tek sınıf-tek kusur tespiti, tek sınıf-çok kusur tespiti, çok sınıf-tek kusur tespiti, çok sınıf-çok kusur tespiti. Tek sınıf-tek kusur tespiti (Single-Class, Sinle-Instance Defect Detection) daha basit senaryolar için kullanılır, burada algoritma mevcut görüntüde var olan yalnızca tek bir kusur sınıfına ait bir hatayı tespit etmektedir. Yani görüntüde etiketlenmiş sadece bir tane kusur (kusurlu bölge) bulunmaktadır. Tek sınıf-çok kusurlu tespitte ise (Single-Class, Multi-Instance Defect Detection), bir görüntüde aynı kusur türünden birden fazla kusur (birden fazla işaretlenmiş kusurlu bölge) bulunabilmektedir. Çok sınıf-tekli kusur tespitinde (Multi-Class, Sinle-Instance Defect Detection), model birden fazla kusur tespiti için eğitilmiş olsa bile bir görüntüde sadece tek bir kusurun olmasına karşılık gelmektedir. Çok sınıflı-çoklu kusur tespiti (Multi-Class, Multi-Instance Defect Detection) ise model yine birden fazla kusur sınıfının tespitine göre eğitilmiştir ve bir görüntüde aynı anda birden fazla aynı veya farklı sınıfa ait kusurlar bulunabilmektedir.

Çizelge 1. Veri Setindeki Sınıf-Kusur Matrisi

Sınıf Sayısı	Görseldeki Kusur Miktarı
Tek Sınıf	Tekli Kusur
Tek Sınıf	Çoklu Kusur
Çok Sınıf	Tekli Kusur
Çok Sınıf	Çoklu Kusur

Benzer çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların büyük bir çoğunluğunda tek sınıf-tekli kusur veya tek sınıf-çoklu kusurlar tespiti yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, YOLO tabanlı bir derin öğrenme modeli kullanarak PCB üretim sürecindeki çok sınıf-çoklu kusur tespitinin gerçekleştirilmesidir. Görüntü özelliği sınıflandırma ve kusurlu bölgeleri tespit etmede çok iyi sonuçlar elde ettiğinden dolayı bu çalışmada da YOLO (You Only Look Once) tabanlı bir derin öğrenme modeli, PCB kusurlarının otomatik tespiti için tercih edilmiştir. Diğer taraftan derin öğrenmeye dayalı nesne dedektörleri iki ana kategoriye ayrılmaktadır: 1) Bir aşamalı dedektörler. 2) İki aşamalı dedektörler. YOLO serisi modeller, nesne tespiti alanında yaygın olarak kullanılan tek aşamalı dedektörlerdir ve sürekli olarak gelişen versiyonları ile bilinirler (Sharma ve Mir 2020). YOLO tabanlı derin öğrenme modelleri nesne tespiti ve sınıflandırma görevlerinde üstün performans göstermektedir ve gerçek zamanlı nesne algılama uygulamaları için çok daha hızlıdır (Bochkovskiy vd. 2020), (Redmon 2016). YOLOv4, giriş görüntüsünü bir ızgaraya bölen ve her ızgara hücresi için birden çok sınırlayıcı kutu ve sınıf olasılığı tahmin eden tek aşamalı bir nesne detektörüdür (Terven vd. 2023). Ayrıca, gerçek sınırlayıcı kutularla yüksek örtüşme puanlarına (IoU) sahip tahmini sınırlayıcı kutuları seçmek için Non-Maximum Suppression (NMS) kullanır.

Bu çalışmada, nesne tespiti performansını kıyaslamak ve en etkili sonuçları belirlemek amacıyla, YOLO serisinin farklı versiyonları arasından YOLOv4 ve YOLOv8 modelleri seçilmiştir. YOLOv8, YOLO serisinin daha yeni bir versiyonu olup, geliştirilmiş mimarisi sayesinde daha hızlı işlem kapasitesi ve düşük gecikme süreleri sunmaktadır. Bu özellik de onu gerçek zamanlı nesne tespiti için daha uygun bir seçenek haline getirmektedir. Makalenin geri kalanı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de, veri setinin hazırlanması, web tabanlı bir yazılım aracı olan Make Sense (İnt. Kay.2) kullanılarak görüntü veri setinin etiketlenmesi ve Google Colab'da derin öğrenme modelinin oluşturulması anlatılmaktadır. Bölüm 3'te deneysel sonuçlar verilmiştir. Ayrıca kusurları manuel olarak etiketlenen bir görüntü, önerilen model tarafından otomatik olarak tespit edilen aynı görüntü ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'te ise sonuçlar tartışılmış, benzer çalışmalarla karşılaştırma yapılmış ve gelecek çalışmalar sunulmuştur.

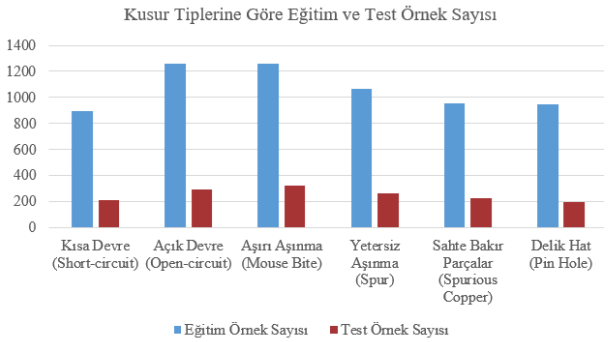
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada farklı kusur türlerini içeren görüntülerden oluşan açık kaynaklı DeepPCB veri seti içinde yer alan, 1194 PCB görüntüsü kullanılmıştır (Tang vd. 2019). Endüstriyel standartlara uygun olarak toplanmış, 16k × 16k piksel boyutundaki yüksek çözünürlüklü ham görüntüler, 640 × 640 piksellik alt görüntülere dönüştürülüp hizalanmış olarak sunulmuştur. Ayrıca bu görüntüler, aydınlatma kaynaklı bozulmaları azaltmak amacıyla ikili hale getirilmiştir. 1194 PCB görüntüsünün 959'u eğitim ve 235'i test için ayrılmıştır. Veri setinde yer alan bu 1194 görüntü üzerinde toplam 7897 adet kusur etiketlenmiştir. Bunlardan 959 eğitim görseli üzerinde etiketlenmiş 6385 kusur (toplam kusur miktarının yaklaşık %80'i) eğitim için, 235 test görseli üzerinde etiketlenmiş 1512 kusur (toplam kusur miktarının yaklaşık %20'si) ise test için kullanılmıştır. Bir görselde birden fazla kusur etiketlenmiş olduğundan, görsel sayısı ile kusur sayısı farklıdır. Bu veri setinin bir başka özelliği de bir görüntünün birden fazla sınıfta kusur içermesi ve aynı sınıf kusurun görüntünün farklı koordinatlarında yer alabilmesidir. Veri kümesi Çizelge 2'den de görüldüğü üzere 6 farklı türde kusur sınıfı içermektedir. Eğitim ve test setleri, sınıflar arasında dengeli bir dağılım olacak şekilde

rastgele bölünmüştür. Şekil 1 farklı PCB kusur sınıflarına ayrılan eğitim ve test örneklerinin sayısal dağılımını göstermektedir.

Çizelge 2. PCB Kusur Tipleri ve Etiket Numaraları

Kusur Tipi	Etiket Numarası
Kısa Devre (Short-circuit)	0
Açık Devre (Open-circuit)	1
Aşırı Aşınma (Mouse Bite)	2
Yetersiz Aşınma (Spur)	3
Sahte Bakır Parçalar (Spurious Copper)	4
Delik Hatlar (Pin Hole)	5



Şekil 1. Eğitim ve Test Setlerinde Sınıfların Dağılımı

Veri seti işaretlemesi için web tabanlı ve masaüstü uygulamalar mevcuttur. Sık tercih edilen web tabanlı araçlar arasında Make Sense (“MakeSense,”), Labelbox ("labelbox,") (İnt.Kay.3), SuperAnnotate ("SuperAnnotate,") (İnt.Kay.7), Roboflow ("Roboflow,") (İnt.Kay.6), Supervisely ("Supervisely,") (İnt.Kay.8) gibi uygulamalar bulunurken; masaüstü araçlar arasında LabelImg ("LabelImg,") (İnt.Kay.4), Labelme ("Labelme,") (İnt.Kay.5) bulunmaktadır. Web tabanlı araçların avantajı kurulum gerektirmeden kullanılması, masaüstü uygulamaların avantajı ise çevrimdışı kullanım sunmasıdır (Mahrishi vd. 2021, Ocepek vd. 2021, Hassan vd. 2024, Ling ve Isa 2023). İşaretleme yapılacak veriye en uygun araç seçilmelidir. Çünkü modelin güven skoru etiketlenen görselin sınırlarına bağlıdır. Ayrıca etiketleme yapmak için gereken süre de tercih edilen araca göre değişmektedir ve bu süreç derin öğrenme modelinin geliştirilmesinde en zahmetli basamak olabilmektedir. Bu çalışmada, kullanım kolaylığı ve ücretsiz erişim olanakları nedeniyle web tabanlı bir uygulama olan Make Sense aracı tercih edilmiştir. Make Sense aracının YOLO için ürettiği çıktı, her bir resim için Şekil 2'de gösterildiği gibi bir txt dosyasıdır.

```
0 0.035714 0.595899 0.044974 0.054233
5 0.595899 0.359788 0.056878 0.055556
2 0.500000 0.398810 0.071429 0.067460
4 0.680556 0.481481 0.070106 0.071429
4 0.792989 0.418651 0.091270 0.091270
3 0.685185 0.615079 0.063492 0.050265
1 0.289683 0.248016 0.063492 0.038360
```

Şekil 2. Make Sense ile Etiketlenmiş Görüntünün Txt Dosyası

Her bir satırda yer alan 5 değer sırasıyla "etiket tipi, x1, y1, x2, y2" formatında belirtilmiştir. YOLO algoritmalarında, etiketlenmiş nesnelerin konumları ve boyutları, görselin boyutlarına göre normalize edilir. Bu normalizasyon işlemi, nesnenin orta noktasının x koordinatı (x_center), y koordinatı (y_center), genişliği (width) ve yüksekliği (height) üzerinden yapılır. x_center ve y_center değerleri, sırasıyla, görselin genişliğine ve yüksekliğine bölünerek hesaplanır. Bu normalizasyon sonucu elde edilen koordinatlar, nesnenin sınırlayıcı kutusunun köşe koordinatlarını hesaplamak için kullanılır. Nesnenin sınırları Denklem (1), (2), (3) ve (4) kullanılarak hesaplanır:

$$x1 = x_center - (width / 2) \quad (1)$$

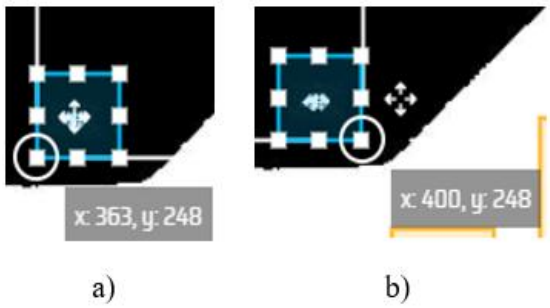
$$y1 = y_center - (height / 2) \quad (2)$$

$$x2 = x_center + (width / 2) \quad (3)$$

$$y2 = y_center + (height / 2) \quad (4)$$

Bu yöntem, YOLO algoritmasının nesne tespiti için kullandığı görüntülerdeki nesnelerin tam olarak yerini ve boyutunu doğru bir şekilde yansıtmak üzere tasarlanmıştır.

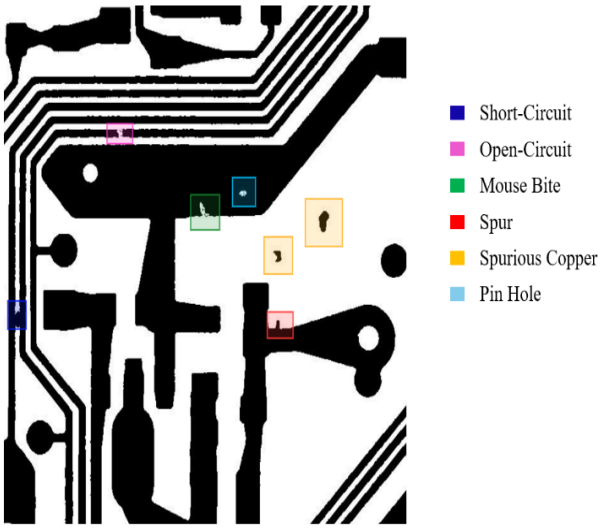
Veri setinde 640 x 640 piksel boyutlarındaki Şekil 4’teki görselde, Şekil 2’de gösterilen etiket sınıfı 5 olan (2.satırdaki) nesnenin x koordinatının başlangıç ve bitiş değerleri Şekil 3.a ve 3.b’ de gösterilmektedir. Bu nesnenin merkez x koordinatı x_center olarak hesaplanır =[[(400-363)/2]+363]/640= 0,6; and width = (400-363)/640= 0,06. Buna göre, x1 yaklaşık olarak x1= 0,6-0,03= 0,57 hesaplanır. Şekil 2, bu değerin daha kesin olarak 0,595899 olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Şekil 2’de 2. Satırda Verilen 5 Nolu Kusura Ait Make Sense Aracında Etiketlenen Bölgeye Ait Koordinatlar a) Nesnenin X Koordinat Başlangıcı b) Nesnenin X Koordinat Sonu

Şekil 4'te, Make Sense aracı kullanılarak etiketlenmiş bir PCB görseli sunulmaktadır. Bu görselde, çeşitli kusurların adları manuel etiketlenmiştir. Etiket isimleri Türkçe verildiğinde derin öğrenme modeli ile test

gerçekleştirilirken Türkçe karakterler tanınmadığından etiketlemede sınıfların İngilizce isimleri kullanılmıştır.



Şekil 4. DeepPCB Veri Kümesindeki Rastgele Seçilmiş Bir Görüntünün Make Sense Aracı ile Manuel Etiketlenmesi

YOLO tabanlı derin öğrenme modelleri nesne tespiti ve sınıflandırma görevlerinde üstün performans göstermektedir ve gerçek zamanlı nesne algılama uygulamaları için çok daha hızlıdır (Bochkovskiy vd. 2020). Ayrıca YOLO, hem CPU hem de GPU'larda çalışacak şekilde optimize edilebilir. Bundan dolayı bu çalışmada PCB kusurlarının otomatik tespiti için YOLO tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan deneysel ortam Google Colab, derin öğrenme aracı da YOLOv4'te Darknet, YOLOv8'de ise PyTorch'tur. Deneysel ortama ait parametreler Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Google Colab Deneysel Çevre Parametreleri

İsim	Parametre
CUDA Versiyon	12.2.0
cuDNN Versiyon	8.9.6
GPU	Tesla T4

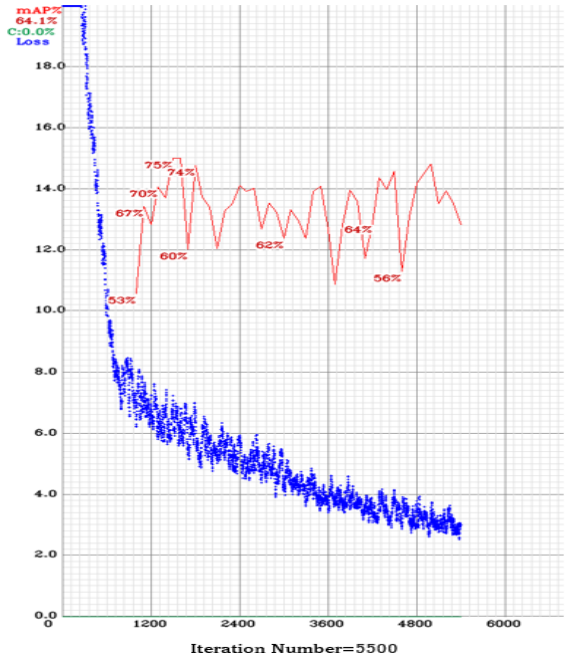
Google Colab, kullanıcıların web tarayıcısı aracılığıyla güçlü GPU'lar ve TPU'lar gibi bulut tabanlı hesaplama kaynaklarına erişim sağlayan ücretsiz bir makine öğrenmesi platformudur. Ancak Google Colab, varsayılan olarak Darknet çerçevesini içermez. Bu nedenle Darknet'in kullanımı için öncelikle kurulması gerekmektedir. Bu süreç, Darknet'in GitHub deposundan gerekli bağımlılıkların yüklenmesini ve kaynak kodunun derlenmesini içermektedir.

Veri kümesini eğitim ve test kümelerine bölünmüştür. Eğitim kümesi, modelin ağırlıklarını ve önyargılarını eğitmek için, test kümesi ise modelin performansının tarafsız bir değerlendirmesini sağlamak için kullanılır. Veri seti ve eğitim aracı dosyaları Google Drive'a yüklenmiştir. Google Colab ortamında Python kullanılarak eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. YOLOv4, YOLOv8 modeline göre daha eski bir model olup, daha düşük donanım gereksinimlerine sahiptir. Bazı eski GPU'larda YOLOv8 modeli ile uyumsuzluklar yaşanabilmektedir, ancak Google Colab'da böyle bir sorun yoktur.

Bu çalışmada da YOLOv4 modelinin performansının yetersiz olduğu tespit edildikten sonra, daha güncel ve etkili olan YOLOv8 ile model eğitimi gerçekleştirilmiştir.

3. Deneyler ve Bulgular

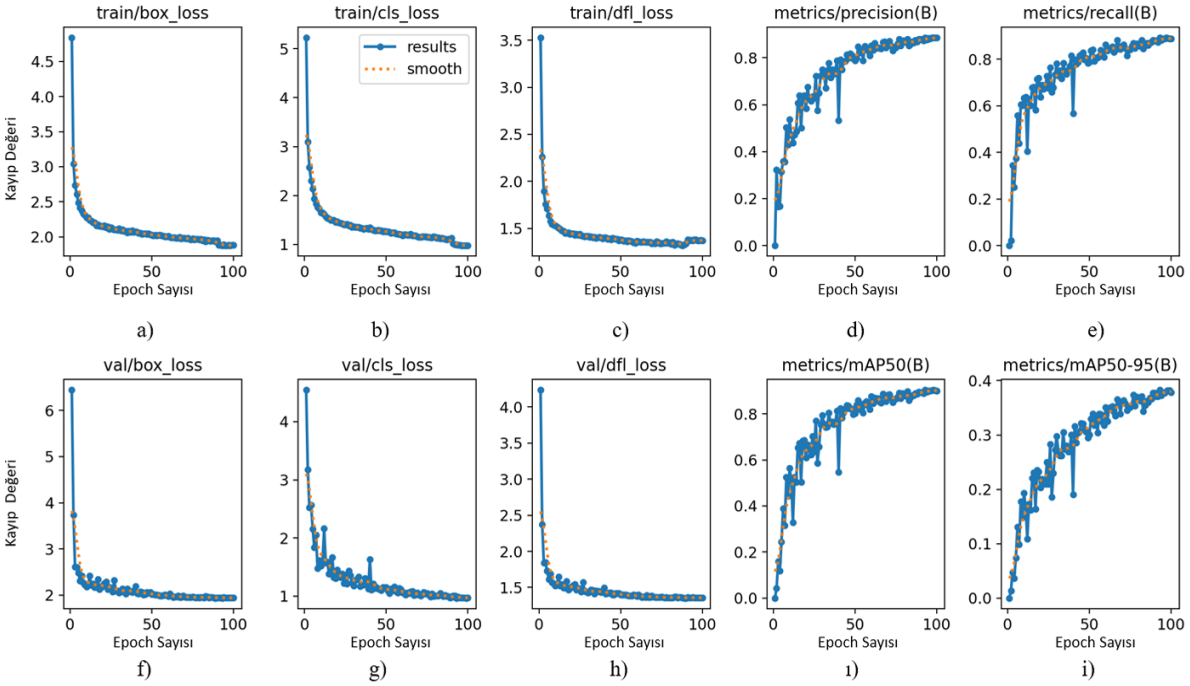
YOLOv4 eğitim sürecini özetleyen grafik Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu grafik, modelin performansını eğitim süresince izlemek ve değerlendirmek için kullanılmaktadır. Kırmızı renkli eğri Ortalama Kesinlik (mean Average Precision, mAP) eğrisidir. Şekil 5'te modelin doğruluğunun eğitim miktarıyla artması beklenirken mAP değerinin zamanla dalgalandığı görülmektedir. Bu durumun veri artırma işlemi sonrasında aşırı öğrenmeyi engelleyeceği öngörülmektedir. Mavi renkli kayıp değişim (loss) eğrisi ise modelin ne kadar yanlış tahmin yaptığını gösterir ve bu değerin düşük olması beklenir. Değişim eğrisinin zamanla azaldığı ve 0'a yaklaştığı görülmektedir. Her iterasyon, modelin ağırlıklarının bir kez güncellendiği anlamına gelir. Örneğin, en sonuncu 5500. iterasyonda modelin kayıp değeri 25 olarak kaydedilmiştir ve mAP değeri %64.1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. YOLOv4 Ağının Eğitim Süreci

YOLOv8 eğitim sürecini özetleyen grafikler ise Şekil 6'da gösterilmektedir. Sunulan her bir eğri farklı performans ve

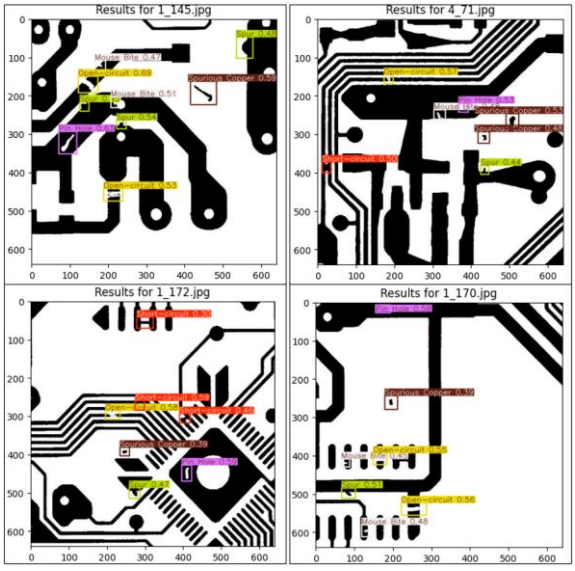
kusur metriklerini temsil eder. Train/box_loss (Şekil6.a) eğrisi, eğitim sırasındaki kutu kaybı olarak ifade edilir. Kutu kaybı nesne tespiti sırasında tahmin edilen kutuların gerçek kutularla olan farkını ölçen bir kayıp fonksiyonudur. Bu kayıp ne kadar düşükse modelin tahminleri o kadar doğru demektir. Train/cls_loss (Şekil6.b) eğrisi eğitim sırasında sınıf kaybını incelemek için kullanılırken train/dfl_loss (Şekil6.c) ve val/dfl_loss (Şekil6.h) eğrisi sınırlayıcı kutuların (bounding boxes) konumlarını daha hassas şekilde optimize etmek için incelenen bir kayıptır. Sınıf kaybı ise modelin tahmin ettiği sınıfın gerçek sınıf ile ne kadar iyi örtüştüğünü ölçen bir kayıp fonksiyonudur. Metrics/precision (Şekil6.d) eğrisi, kesinlik (precision), metrics/recall (Şekil6.e) eğrisi duyarlılık (recall) oranını ifade eder. Val/box_loss (Şekil6.f) eğrisi doğrulama (validation) verisi üzerindeki kutu kaybını, val/cls_loss (Şekil6.g) eğrisi ise doğrulama (validation) verisi üzerindeki sınıf kaybını ifade eder. metrics/map50 (Şekil6.ı) eğrisi mAP@50, ortalama kesinlik (precision) değeridir. mAP@50, modelin IoU 0,50'nin üzerinde olan tahminlerinin kesinliğini ölçer. Bu eğri modelin genel başarı performansını gösterirken, metrics/map50-95 (Şekil6.i) eğrisi mAP@50-95, IoU eşik değerlerinin 0,50'den 0,95'e kadar değiştiği bir aralıkta hesaplanan ortalama kesinlik değeridir. Bu daha genel bir performans ölçümüdür ve modelin farklı hassaslık seviyelerindeki kesinliği gösterir.



Şekil 6. YOLOv8 Ağının Eğitim Süreci

Şekil 7'de YOLOV8 modeline ait test sonuçları sunulmuştur. Test veri setinde 4_71 olarak adlandırılan görselin kusur tahmin sonuçları, manuel olarak Make Sense platformunda oluşturulan Şekil 4'teki etiketlemeyle uyum göstermektedir. Eğitim veri seti Şekil 4'teki 4_71 görselini içermemektedir. Bu görsel sadece test veri setinde yer almaktadır. Şekil 4 sadece etiketlemenin nasıl yapıldığı hakkında bilgi vermek amacıyla kullanılmıştır.

YOLOv4 modelinin sonuçları incelendiğinde, modelin eğitim süresince karşılaştığı zorluklar ve performans dalgalanmaları gözlemlenmiştir. Ancak, daha güncel bir model olan YOLOv8'in performansı, YOLOv4'e kıyasla önemli ölçüde daha iyidir. YOLOv8 modeli, %93,5 gibi daha yüksek bir mAP@50 değeri ile yüksek IoU eşiklerinde bile kusurları daha doğru bir şekilde sınıflandırma ve tespit etme yeteneğine sahiptir.



Şekil 7. Test Sonuçları

Yüzey kusuru tespitinde yaygın olarak kullanılan farklı değerlendirme ölçütleri bulunmaktadır. Her piksel, zemin gerçeği ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılmasına dayanarak dört kategori ile sınıflandırılmaktadır: 1) Gerçek pozitif (TP), gerçekte kusurlu olarak sınıflandırılmış kusur örneklerinin kusurlu olarak tahmin edilme sayısını belirtir; 2) Gerçek negatif (TN), gerçekte kusursuz örneklerin, kusursuz olarak tahmin edilme sayısını belirtir; 3) Yanlış pozitif (FP), gerçekte kusurlu örneklerin kusursuz örnekler olarak tahmin edilme sayısını belirtir; 4) Yanlış negatif (FN), gerçekte kusursuz örneklerin kusurlu olarak tahmin edilme sayısını belirtir (Ameri vd. 2024). Çizelge 4'te sunulan karşılaştırmalı veriler, YOLOv8'in her bir kusur türü için daha düşük yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) değerleri ile daha etkin bir performans sergilediğini göstermektedir. Örneğin, 'Açık Devre' kusur türünde YOLOv4 modeli 218 doğru pozitif (TP), 76 FP ve 74 FN kaydetmişken, YOLOv8 modeli 289 TP, sadece 25 FP ve 3 FN kaydetmiştir.

Duyarlılık (Recall), modelin tespit etmesi gereken tüm nesnelerden kaç tanesini doğru bir şekilde tespit ettiğini gösterir. Kesinlik (Precision), modelin tespit ettiği nesnelerden kaç tanesinin doğru olduğunu gösterir. Doğruluk (ACC) ise doğru sınıflandırılan örnek sayısının toplam örnek sayısına bölünmesiyle elde edilen değerdir. Bu değerler, sırasıyla Denklem (5), (6), (7) ve (8) ile hesaplanabilir.

$$\text{Duyarlılık (Recall)} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (5)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (6)$$

$$\text{F1} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (7)$$

$$\text{Doğruluk (ACC)} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (8)$$

YOLOv4 ve YOLOv8 modelleri ile 235 test görüntüsü üzerindeki toplam 1512 kusur, Çizelge 5'te değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. YOLOv4 modelinde mAP@50 değeri tüm sınıflar için %64,1 iken, YOLOv8 için bu değer %93,5 olarak elde edilmiştir. Bu metrikler, modelin doğruluğunu, hassasiyetini ve güvenilirliğini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır ve modelin çeşitli hata türlerini ne kadar doğru tespit edebildiğini göstermektedir.

Çizelge 4. YOLOv4 ve YOLOv8 Modelinin Sınıflara göre Performans Metrikleri

	YOLOv4			YOLOv8		
Kusur Tipi	**TP**	**FP**	**FN**	**TP**	**FP**	**FN**
Kısa Devre	150	52	59	199	22	8
Açık Devre	218	76	74	289	25	3
Aşırı Aşınma	212	119	110	315	44	7
Yetersiz Aşınma	183	85	80	259	31	4
Sahte Bakır Parçalar	181	58	48	226	37	3
Delik Hatlar	168	30	31	197	22	2

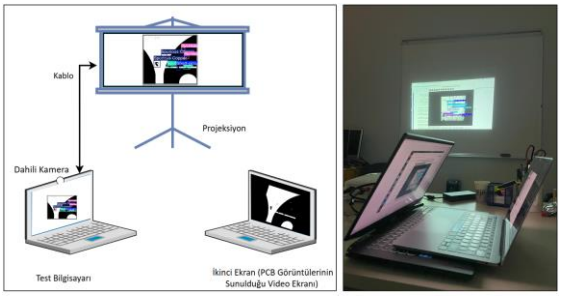
Çizelge 5. YOLOv4 ve YOLOv8 Değerlendirme Parametreleri

	YOLOv4					YOLOv8				
Sınıf	**Doğruluk Oranı (%)**	**mAP@50 (%)**	**Duyarlılık (%)**	**Kesinlik (%)**	**F1 Skor**	**Doğruluk Oranı (%)**	**mAP@50 (%)**	**Duyarlılık (%)**	**Kesinlik (%)**	**F1 Skor**
Kısa Devre	57,4	60,5	71,7	62,8	66,9	96,1	96,3	93,2	92,7	93,0
Açık Devre	59,2	64,2	74,6	65,8	69,9	98,9	90,5	89,7	88,2	89,0
Aşırı Aşınma	48	50,6	65,8	51,1	57,5	97,8	90,7	89,7	88,9	89,3
Yetersiz Aşınma	52,5	57,9	69,5	55,9	62	98,4	94,4	94,3	94,1	94,2
Sahte Bakır Parçalar	63	70,9	79	71,1	74,8	98,6	93,0	88,1	90,6	89,3
Delik Hatlar	73,3	74,7	84,4	78,0	81,1	98,9	96,3	93,5	93,9	93,7

3.1 Gerçek Zamanlı Deney Simülasyonu

Bu çalışmada geliştirilen derin öğrenme modeli, PCB üzerindeki kusurları tespit etmek amacıyla gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Gerçek zamanlı deney simülasyonunun temel amacı, modelin pratik uygulama potansiyelini göstermektir. Modelin performansını gerçek dünya koşullarına benzer bir ortamda test etmek için, PCB görselleri bir ekranda gösterilmiş ve bu görseller farklı bir bilgisayarın dahili kamerası aracılığıyla algılanmış ve test veri seti model tarafından test edilmiştir. Simülasyon için, Şekil 8'de gösterildiği gibi, YOLOv8 modelinin gerçek zamanlı test kodunun çalıştırıldığı bilgisayar, bu test kodunun yansıtıldığı bir projeksiyon ekranı ve PCB görsellerinin gösterildiği ikinci bir bilgisayar olmak üzere toplam 3 donanım kullanılmıştır. Test bilgisayarında çalışmalar Intel(R) Core(TM) i7-6700K CPU @ 4.00GHz CPU özellikli VirtualBox sanal makinesinde, Ubuntu 22.04 işletim sisteminde, Python 3.10.12 ile Jupyter Notebook ortamında gerçekleştirilmiştir. İkinci ekranda ise görseller, beş saniye aralıklarla değiştirilmiştir. Test bilgisayarının

kamerasının açısı, görüntüleme cihazının ekranına doğru yönlendirilmiş ve ikinci ekranda farklı PCB görselleri sırayla tam ekran modunda video olarak gösterilmiştir. Her bir görsel için, modelin algılama sonuçları gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen YOLOv8 modelimiz ile farklı kusur türlerini gerçek zamanlı nasıl tespitine yönelik video ilgili linkten izlenebilir. (İnt. Kay.1).



a) Şematik Gösterimi b) Gerçek Görüntüsü

Şekil 8. Gerçek Zamanlı Deney Düzeneği

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma, geliştirme sürecinin ilk adımında, PCB görüntülerinde çok sınıflı kusur tespiti, tanıma ve sınıflandırma için YOLOv4 modelinin performansını değerlendirmektedir. Analiz sonuçlarına göre, "Delik Hatlar" sınıfı %73,3 doğruluk, %78,0 ortalama kesinlik, %84,4 duyarlılık ve %81,1 F1 puanı ile en başarılı tespit edilmiş kusur türüdür. Bu sonuçlar, modelin öne çıkan kusur özelliklerini etkili bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir. Öte yandan, %48 doğruluk, %51,1 ortalama kesinlik, %65,8 duyarlılık ve %57,5 F1 skoru ile "Aşırı Aşınma" sınıfı modelin zorlandığı bir alan olarak tespit edilmiş ve modelin bu sınıf için geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Çok sınıflı kusur tespiti için %64,1'lik mAP değeri (Çizelge 5'te verilen her sınıf için ortalama kesinlikler), modelin aynı anda birden fazla kusur türünü tanıma becerisinde bir miktar başarı gösterdiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu değer modelin potansiyelini tam olarak yansıtmamakta ve performansında daha fazla iyileştirme için hala yer olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen YOLOv4 ve YOLOv8 sonuçları, literatürde yer alan diğer çalışmalarla birlikte Çizelge 6'da detaylı olarak sunulmaktadır. Literatürde kullanılan farklı veri setleri, sınıf sayıları ve modellerin performans metrikleri göz önünde bulundurulduğunda, önerilen modelin mAP@50 metriğinde çok sınıf-çoklu kusur kategorisinde rekabetçi bir başarı elde ettiği görülmektedir. Örneğin, bu çalışmadaki YOLOv4 modeli ile kusur sınıflandırması için %64,1 düşük bir mAP oranı gibi görünse de, literatürde çok sınıf-çok kusurlu veri setleri için YOLOv4 modelinde verilen orandan daha yüksektir ve Chen vd. tarafından yapılan çalışmada her kusur için farklı bir puan hesaplanmıştır. Ancak çalışmadaki çoğu modelde ortalama mAP değeri %50'yi aşmamıştır. Xie ve arkadaşlarının çalışmasında aynı veri seti ve YOLOv4 algoritmasıyla mAP@ 98,5 olarak elde edilmiştir. Bu çalışma ile Xie ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan veri seti her ne kadar aynı gözükse de bir miktar farklılık bulunmaktadır. Bu çalışmada veri setinde bulunan 1500 görselden sadece 1194'ü; ancak Xie ve arkadaşlarının çalışmasında ise 1500 görselin tamamı kullanılmıştır (Xie vd. 2023). Ayrıca Xie ve arkadaşlarının YOLOv4 modelinin eğitim sürecinde hiper parametreler genetik algoritmayla optimize edilmiştir. Bizim çalışmamızda ise YOLOv4'ün varsayılan standart değerleri kullanılmıştır.

Bu çalışmanın geliştirme sürecinin ikinci adımında, performansı artırmak amacıyla YOLOv8 modeli varsayılan standart parametrelerle kullanılmış ve gerçek zamanlı test bu model üzerinde çalıştırılmıştır. YOLOv8m modelinin mAP@50 değeri 93,5'tir ve PCB kusurlarını tespit etmede YOLOV4'e göre daha başarılı olmuştur. Modelin her sınıf için mAP değerleri %90'ı aşmış, özellikle kısa devre ve delik hatlar sınıfında maksimum %96,3 değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, YOLOv8m modelinin, YOLOv4 modeline göre %29,4 daha yüksek mAP@50 değerine sahip olduğunu ve dolayısıyla daha iyi bir tespit performansı sunduğunu göstermektedir.

Bu tür çalışmalarda elde edilen mAP değerleri genellikle yüksektir. Ancak bu çalışmada olduğu gibi çok sınıflı çoklu kusur tespitine yönelik çalışmalar devam etmektedir ve bu alan halen aktif bir araştırma konusudur. Bu tür karmaşık senaryolarda mAP değerlerinin daha düşük olması beklenmektedir. Çünkü modelin aynı anda birden fazla sınıfı ve her sınıftan birden fazla kusuru tespit etmesi gerekmektedir. Bu durum mevcut modellerin sınırlarını zorlamakta ve algoritma geliştiricilerinin yeni iyileştirme yolları aramasını gerektirmektedir. Dolayısıyla bu çalışma, çok sınıflı çoklu kusur tespiti için derin öğrenme modellerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu alanda yapılacak daha fazla araştırma, PCB üretim süreçlerindeki hata tespit sistemlerinin genel performansını artıracak ve endüstriyel otomasyonu daha da ilerletecektir. Simülasyondan da görüldüğü gibi yaklaşık 1 görsellik bir gecikme ile kusur tespiti yapılmaktadır. Modelin tespit doğruluğunu artırırken bir yandan da hızının artırılması önemlidir. Gelecek çalışmalarda modelin FPGA üzerinde donanım hızlandırmasının kusur tespiti üzerindeki etkilerini incelemek hedeflenmektedir.

Çizelge 6. Derin Öğrenme Tabanlı Kusur Tespiti Üzerine Odaklanan Çalışmalar

Referans	Veri Seti	Sınıf Sayısı	Görseldeki Kusur Durumu	Model	mAP @50 (%)
Sezer, A., & Altan, A. (2021)	274 görüntü üzerinde 324 kusur bulunmaktadır.	6	Çoklu Kusur	CNN	96,40
Adibhatla, V. A., Chih, H. C., Hsu, C. C., Cheng, J., Abbod, M. F., & Shieh, J. S. (2021)	23.000 görüntü kullanılmış olup, eğitim amaçlı 20.700 görüntü ve test amaçlı 2300 görüntü olmak üzere ayrılmıştır.	2 (Kusurlu veya kusursuz)	Çoklu Kusur	YOLOv5	99,74
Zhang, Y., Xie, F., Huang, L., Shi, J., Yang, J., & Li, Z. (2021)	1455 eğitim görüntüsü, 624 test görüntüsü içerir.	6	Çoklu Kusur	Feature Pyramid Network (FPN)	44,3
Luo, J., Yang, Z., Li, S., & Wu, Y. (2021)	1124 görüntü üzerinden etiketlenmiş 2556 adet kusur bulunmaktadır.	7	Çoklu Kusur	CNN	94,15
Xuan, W., Jian-She, G., Bo-Jie, H., Zong-Shan, W., Hong-Wei, D., & Jie, W. (2022)	2654 orijinal PCB yüzey kusuru görüntüsü veri artırma işleminden sonra, 18.572 görüntüye çıkarılmıştır. 18.572 görüntü üzerinde 37675 adet kusur bulunmaktadır.	6	Tekli Kusur	YOLOX	99,13
Xie, Y., Hu, W., Xie, S., & He, L. (2023)	DeepPCB veri seti ile 1500 görüntü	6	Çoklu Kusur	FE-YOLO YOLOv4	98,9 98,5
LI, W. (2024)	İnternet kaynakları ve Roboflow'un geniş PCB arıza görüntüleri koleksiyonunun birleşiminden derlenmiştir.	5	Tekli Kusur	YOLOv8x	98,9
Du, M., Chen, M., Cao, X., & Takamasu, K. (2024)	1370 görüntü üzerinden etiketlenmiş 2046 adet kusur bulunmaktadır.	5	Tekli Kusur	RSE-YOLO	93,9
Chen, Z., Zhu, Q., Zhou, X., Deng, J., & Song, W. (2024)	10.000 deri yüzey kusuru görüntüsü bulunmaktadır.	8	Çoklu Kusur	YOLOv8x	52,3
Bu çalışma	DeepPCB veri seti ile 1194 görüntü üzerinden etiketlenmiş 7.899 adet kusur bulunmaktadır.	6	Çoklu Kusur	YOLOv8m YOLOv4	93,5 64,1

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Prof.Dr.Hayriye KORKMAZ ve Dr.Sezen BAL danışmanlığında İzemnur BUDAK tarafından 17/09/2024 tarihinde tamamlanan "FPGA Tabanlı PCB Hata Tespitinde Derin Öğrenme Uygulaması" başlıklı ve 10678126 tez no'lu yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Deney, Yazma, Görselleştirme, Kaynaklar

Yazar 2: Fikir Sahibi, Araştırma, Deney, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji

Yazar 3: Proje Yöneticisi, Araştırma, Deney, Görselleştirme, Yazma, Kaynaklar

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında kullanılan veri seti açık kaynak olup https://github.com/tangsanli5201/DeepPCB linkinden indirilebilir.

5. Kaynaklar

Adibhatla, V. A., Chih, H. C., Hsu, C. C., Cheng, J., Abbod, M. F., & Shieh, J. S., 2021. Applying deep learning to defect detection in printed circuit boards via a newest model of you-only-look-once. *Mathematical Biosciences and Engineering,* **18**,**4**, 4411-4428 https://doi.org/10.3934/mbe.2021223

Ameri, R., Hsu, C. C., & Band, S. S., 2024. A systematic review of deep learning approaches for surface defect detection in industrial applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **130**, 107717. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107717

Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M., 2020. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934

Chen, Z., Zhu, Q., Zhou, X., Deng, J., & Song, W., 2024. Experimental Study on YOLO-Based Leather Surface Defect Detection. *IEEE Access,* **12***,* 32830-32848 https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3369705

Ding, R., Dai, L., Li, G., & Liu, H., 2019. TDD-net: a tiny defect detection network for printed circuit boards. *CAAI Transactions on Intelligence Technology,* ***4*****(2)**, 110-116. http://dx.doi.org/10.1049/trit.2019.0019

Du, M., Chen, M., Cao, X., & Takamasu, K., 2024. Deep Learning-Based Multi-Species Appearance Defect Detection Model for MLCC. *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement,***73** https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3375957

Hassan, M. H., Reiter, E., & Razzaq, M., 2024. Automatic ovarian follicle detection using object detection models. http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-4637709/v1

Kim, J., Ko, J., Choi, H., & Kim, H., 2021. Printed circuit board defect detection using deep learning via a skip-connected convolutional autoencoder. *Sensors,* **21(15)**, 4968. https://doi.org/10.3390/s21154968

Li, W. H., Zhang, H. O., Wang, G. L., Xiong, G., Zhao, M. H., Li, G. K., & Li, R. S., 2023. Deep learning based online metallic surface defect detection method for wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* **80**, 12. http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102470

Li, Z., Chen, J., Huang, H., & Dong, X., 2023. *Defect Detection in Computer Motherboard Assembly through Fusion of Multi-Scale Features and Attention Mechanisms.* Paper presented at the 2023 9th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). http://dx.doi.org/10.1109/ICSAI61474.2023.10423311

Liao, X., Lv, S., Li, D., Luo, Y., Zhu, Z., & Jiang, C., 2021. YOLOv4-MN3 for PCB surface defect detection. *Applied Sciences,* **11(24)**, 11701. https://doi.org/10.3390/app112411701

Lin, Q., Zhou, J., Ma, Q., Ma, Y., Kang, L., & Wang, J., 2022. EMRA-Net: A pixel-wise network fusing local and global features for tiny and low-contrast surface defect detection. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **71**, 1-14. https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3151926

Ling, Q., & Isa, N. A. M., 2023. Printed circuit board defect detection methods based on image processing, machine learning and deep learning: A survey. *Ieee Access,* **11**, 15921-15944. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3245093

Luo, J., Yang, Z., Li, S., & Wu, Y., 2021. FPCB surface defect detection: A decoupled two-stage object detection framework. *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement,* **70**, 1-11. http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3092510

Mahrishi, M., Morwal, S., Muzaffar, A. W., Bhatia, S., Dadheech, P., & Rahmani, M. K. I., 2021. Video index point detection and extraction framework using custom YoloV4 Darknet object detection model. *Ieee Access,* **9**, 143378-143391. http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3118048

Ocepek, M., Žnidar, A., Lavrič, M., Škorjanc, D., & Andersen, I. L., 2021. DigiPig: First developments of an automated monitoring system for body, head and tail detection in intensive pig farming. *Agriculture,* **12(1)**, 2. https://doi.org/10.3390/agriculture12010002

Redmon, J., 2016. You only look once: Unified, real-time object detection. *IEEE conference on computer vision and pattern recognition.* 779-788 https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

Sharma, V. K., & Mir, R. N., 2020. A comprehensive and systematic look up into deep learning based object detection techniques: A review. *Computer Science Review,* **38**, 100301. http://dx.doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100301

Sezer, A., & Altan, A., 2021. Detection of solder paste defects with an optimization-based deep learning model using image processing techniques. *Soldering & Surface Mount Technology*, **33(5)**, 291-298. https://doi.org/10.1108/SSMT-04-2021-0013

Subramanyam, V., Kumar, J., & Singh, S. N., 2022. Temporal synchronization framework of machine-vision cameras for high-speed steel surface inspection systems. *Journal of Real-Time Image Processing,* ***19*****(2)**, 445-461. http://dx.doi.org/10.1007/s11554-022-01198-z

Tang, S., He, F., Huang, X., & Yang, J., 2019. Online PCB defect detector on a new PCB defect dataset. arXiv preprint arXiv:1902.06197. https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.06197

Terven, J., Córdova-Esparza, D.-M., & Romero-González, J.-A., 2023. A comprehensive review of yolo architectures in computer vision: From yolov1 to yolov8 and yolo-nas. *Machine Learning and Knowledge Extraction,* **5(4)**, 1680-1716. https://doi.org/10.3390/make5040083

LI, W., 2024. Detecting defects in PCB manufacturing: an exploration using Yolov8 deep learning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s12008-024-01986-w

Wang, X., Zhang, H., Liu, Q., Gong, W., Bai, S., & You, H., 2024. YOLO's multiple-strategy PCB defect detection model. *IEEE MultiMedia*. https://doi.org/10.1109/mmul.2024.3359267

Xie, Y., Hu, W., Xie, S., & He, L., 2023. Surface defect detection algorithm based on feature-enhanced YOLO. *Cognitive Computation*, **15(2)**, 565-579. https://doi.org/10.1007/s12559-022-10061-z

Xuan, W., Jian-She, G., Bo-Jie, H., Zong-Shan, W., Hong-Wei, D., & Jie, W., 2022. A lightweight modified YOLOX network using coordinate attention mechanism for PCB surface defect detection. IEEE sensors journal, **22(21)**, 20910-20920. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3208580

Zhang, Q., & Liu, H., 2021. *Multi-scale defect detection of printed circuit board based on feature pyramid network,* **31**, 1, 76-87. http://dx.doi.org/10.1109/MMUL.2024.3359267

Zhang, Y., Xie, F., Huang, L., Shi, J., Yang, J., & Li, Z., 2021. A lightweight one-stage defect detection network for small object based on dual attention mechanism and PAFPN. *Frontiers in Physics,* **9**, 708097. http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2021.708097

İnternet kaynakları

1. Budak,İ. *Gerçek Zamanlı PCB Kusur Tespiti* [Video dosyası]. https://drive.google.com/drive/folders/1fS9EMJAtJaci67d6lKK-qT6VJc5-4Vj_?usp=sharing (25.11. 2024)
2. Make Sense, https://www.makesense.ai/, (10.08. 2024)
3. Labelbox, https://labelbox.com/, (10.08. 2024)
4. LabelImg, https://medium.com/@pat.x.guillen/setting-up-labelimg-1ad1887d91c5, (10.08. 2024)
5. Labelme, https://github.com/labelmeai/labelme, (10.08. 2024)
6. Roboflow, https://roboflow.com/, (10.08. 2024)
7. SuperAnnotate, https://superannotate.medium.com/introduction-to-object-detection-with-deep-learning-f4d2b9f4d1b5, (10.08. 2024)
8. Supervisely, https://supervisely.com/labeling-toolbox/images/, (10.08. 2024)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1580440
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045203 (827-837)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045203 (827-837)

Decision Support Systems Based on Machine Learning for Detection of Liver Diseases

Karaciğer Hastalıklarının Tespiti İçin Makine Öğrenmesine Dayalı Karar Destek Sistemleri

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 06.11.2024
Kabul/Accepted: 28.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Pınar İLTER [1*], Yasin KIRELLİ[2]

[1] *İstinye University, Data Science Department, İstanbul, Türkiye*
[2] *Kutahya Dumlupınar University, Management Information Systems Department, Kütahya, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

The liver, the largest metabolic organ in the human body, plays a crucial role in maintaining essential functions. However, the rise in liver diseases in recent years has become a significant public health issue. There are various causes of these diseases, and the impact of technology in the health field has become necessary to analyze and manage diseases. Although there are various causes of liver diseases, analyzing and diagnosing them is crucial. Technological developments have made it possible to use machine learning methods to analyze large data sets. In this study, machine learning techniques are used in the early diagnosis and classification of liver disease, and the results are evaluated. The 'ILPD (Indian Liver Patient Dataset)' dataset in the UCI Machine Learning Repository has been evaluated using six modern machine learning techniques, including logistic regression, random forest, and decision trees. The study also analyses the effects of data preprocessing, feature selection, and normalization on model performance. Model results show that feature selection and normalization are essential in improving model accuracy. The Logistic Regression model achieved the best performance with an accuracy of 80%, while other algorithms, such as Random Forest and AdaBoost, also achieved high accuracy rates. This research demonstrates the potential of machine learning techniques in the early detection of liver diseases and provides a basis for future work.

Keywords: *Liver Patient Detection; Machine Learning; Health Data; Decision Support Systems.*

Öz

İnsan vücudundaki en büyük metabolik organ olan karaciğer, yaşamsal işlevleri yerine getirmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak son yıllarda artan karaciğer hastalıkları toplum sağlığı üzerinde ciddi bir sorun haline gelmiştir. Bu hastalıkların çeşitli nedenleri bulunmakta olup teknolojinin sağlık alanındaki etkisi ile hastalıkların analizi ve yönetimi önemli hale gelmiştir. Karaciğer hastalıklarının çeşitli etkenleri bulunmakla birlikte, bu hastalıkların analizi ve teşhisi önemlidir. Teknolojik gelişmeler, büyük veri setlerinin analizinde makine öğrenimi yöntemlerini kullanmayı mümkün kılar hale getirmiştir. Bu çalışmada karaciğer hastalığı erken teşhisi ve sınıflandırmada makine öğrenmesi teknikleri kullanılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. UCI Machine Learning Repository'de bulunan "ILPD (Indian Liver Patient Dataset)" veri seti ile Lojistik Regresyon, Rastgele Orman, Karar Ağaçları gibi altı farklı modern makine öğrenmesi teknikleri ile değerlerndirilmiştir. Çalışma ek olarak veri ön işleme, özellik seçimi ve normalizasyonun model performansı üzerindeki etkilerini de analiz etmektedir. Model sonuçları özellik seçimi ve normalizasyonun model doğruluğunu artırmada önemli rol oynadığını göstermektedir. Lojistik Regresyon modeli %80 oranında doğruluk ile en iyi performans elde edilmiştir, Rastgele Orman ve AdaBoost gibi diğer algoritmalar da yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Bu araştırma, karaciğer hastalıklarının erken teşhisinde makine öğrenmesi tekniklerinin potansiyelini ortaya koymakta ve gelecekteki çalışmalar için bir temel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Karaciğer Hastalığı Tespiti; Makine Öğrenmesi; Sağlık Verisi; Karar Destek Sistemleri*

1. Introduction

Liver is a vitally important metabolic organ, with essential tasks such as clearing toxins from the gastrointestinal blood and producing hormones and enzymes. In the case of disease, the body signals many health problems with these reactions. Due to its role in numerous metabolic and detoxification processes, the liver is frequently affected secondarily by disorders originating in other organ systems (Hashem and Mabrouk 2014). Several factors cause liver disease, and if these factors are not detected early, the disease can progress and lead to severe liver failure. In studies, it has been observed that contaminated food consumption, genetic disorders, excessive fat accumulation, hepatocyte damage due to bacterial, viral or bacterial viral or fungal infections, diabetes, and excessive consumption of alcohol or medications are associated with liver disease (Pan et al., 2022). Liver diseases can sometimes have no symptoms

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Pınar İLTER e-posta/e-mail: pinar.ilter@stu.istinye.edu.tr

in the early stages or can be vague, such as weakness and loss of energy. Symptoms often vary depending on the type and extent of liver disease (Haeng Hur et al., 2024; Wu and Moeckel 2023; Yan et al., 2024).

Early diagnosis of liver diseases, prevention of the disease, and early initiation of the treatment process contribute to more promising outcomes for patients. In addition, disease-causing factors may show different trends regionally in the population. In a study on non-alcoholic fatty liver disease (NaFLD), which has recently become a public problem, it has been reported that it is increasing in the young population, especially in adults, in developed countries. The disease begins with an abnormal accumulation of triglycerides in the liver and can cause an inflammatory response in some patients, progressing to cirrhosis and liver cancer. NAFLD is strongly associated with obesity and insulin resistance, but its pathogenesis is still poorly understood, and treatment options are limited (Cohen et al., 2011). Invasive and non-invasive methods are applied to determine the diagnosis of liver diseases.

The widespread use of technology in the healthcare sector enables different methods to diagnose various diseases. One of these methods is machine learning techniques, which can provide significant results. Data stored in digital environments are analyzed using machine learning, statistical and mathematical methods, and numerical learning models are created (Guo et al., 2022; Priya et al., 2018; Yu et al., 2024; Eyupoglu et al., 2024). Machine learning techniques have shown promising results in predicting and classifying liver diseases based on patient data. The use of machine learning techniques in liver disease prediction and classification is a dynamic area of research to reduce healthcare costs (Tokala et al., 2023). These studies are important in developing an effective decision-support system in medical processes. To achieve this goal, extracting and gaining insights from raw data is critical, which is accomplished through knowledge discovery and data mining (KDD) processes. This study conducted to predict liver disease using machine learning methods with the ILDP dataset. The main contributions of this study can be summarized as follows:

- Implementation of multiple machine learning algorithms to assess their effectiveness in liver disease detection.
- Evaluation of the impact of feature selection and normalization on model performance.
- Comparative analysis of different machine learning techniques, including Random Forest and AdaBoost and Ensemble learning.
- Establishing a foundation for future research in liver disease diagnosis using machine learning.

2. Literature Research

The liver performs many vital functions in the body, so if it becomes diseased or damaged, losing these functions can severely impact health. Referred to as hepatic disease, liver disease is a general term that includes all issues impairing the liver's ability to function properly. Typically, a significant reduction in liver function occurs only when more than 75% of the liver tissue is affected.

These are among the functions of the liver:

- Bile production is required for the digestion of food, especially fats

- Storing extra glucose or sugar as glycogen and converting it back into glucose when the body needs energy

- Production of blood clotting factors

- Production of amino acids (building blocks used to make proteins), including those used to control infection

- Urea conversion for excretion of waste products of metabolism in the urine

- Processing medications into their active forms within the body. Cirrhosis refers to lasting scarring in the liver, where healthy liver cells are substituted by scar tissue that cannot carry out normal liver functions.

Acute liver failure can often be reversible, except sometimes when there is a treatable cause, and the liver can return to normal. The first assessment to understand whether the liver injury is acute or chronic, the underlying etiology, and its relationship with systemic diseases is to take the patient's history and perform a physical examination. Based on the findings, the second step to diagnose liver disorders is urine and blood tests, usually performed non-invasively. Liver enzymes are of great importance in the diagnosis of liver diseases. The main enzymes for measuring liver values are Alanine Aminotransferase (SGPT, ALT) and Aspartate Aminotransferase (SGOT, AST). Habits such as smoking and alcohol consumption trigger liver diseases and play a role in increasing these enzymes (Ersoy 2012; Saygın and Baykara 2021). Many factors can lead to the development of liver diseases. These factors can be categorized as follows.

Infection: The liver can become infected with parasites and viruses, leading to inflammation or edema of the liver and compromising liver function. The virus that usually causes liver damage is transmitted through blood or

semen and is usually spread through contaminated food, dirty water or contact with an infected person. Liver infections such as hepatitis A, C, and B can affect humans (Calleja-Panero et al., 2024; Haeng Hur et al., 2024; Maria Jesi and Antony Asir Daniel 2024; Wei et al., 2024; Wu and Moeckel 2023).

Immune System Abnormality: Certain diseases can disrupt the body's immune system, causing it to mistakenly target other organs, including the liver. Examples of such conditions are autoimmune hepatitis, primary biliary cholangitis, and primary sclerosing cholangitis.

Inheritance: An uncommon gene inherited from both parents may lead to an accumulation of certain compounds in the liver, resulting in liver damage. Genetic liver disorders include conditions like Wilson's disease, hemochromatosis, and alpha-1 antitrypsin deficiency.

Cancer and Other Developments: Types of cancer that cause liver diseases include conditions such as liver adenoma, bile duct cancer, and liver cancer.

Other Common causes include long-term alcohol abuse, fatty deposits in the liver (NAFLD), certain medications or over-the-counter treatments, and certain herbal concoctions.

Risk Factors: Factors that may increase the risk of liver disease include excessive alcohol consumption, being overweight, type 2 diabetes, tattooing, body puncture, injection of drugs with used needles, blood transfusion, contact with foreign blood, unprotected sex, exposure to chemicals, and genetic factors (Priya et al., 2018).

The symptoms of liver disease can be varied, and each patient may experience different symptoms. However, in general, some common symptoms of liver disease may include,

Jaundice: Yellowing of the skin and eyes.

Cholestasis: Blockage of bile flow can lead to symptoms such as itching of the skin.

Liver Size: When the liver is more prominent than usual.

Portal Hypertension: High blood pressure caused by blockage of blood vessels in the liver.

Esophageal Varices: Dilated veins on the esophagus (food pipe) due to portal hypertension can cause bleeding.

Ascites: Fluid accumulation in the abdominal cavity, swelling, and discomfort in the abdomen.

Hepatic Encephalopathy: Changes in brain function due to impaired liver function, which can lead to impaired mental status.

Liver Failure: The liver's inability to perform its functions can lead to a range of health issues. To evaluate these symptoms, a physical examination is conducted initially, followed by relevant imaging and diagnostic tests like liver function tests, liver biopsy, ultrasound, CT scan, or MRI, depending on the patient's needs. These assessments help determine the type and extent of liver disease.

Studies on datasets related to liver diseases have been analyzed. Within the scope of this study, major literature studies focusing on similar topics are discussed, and the results obtained are analyzed in detail. Saygın and Baykara has been used the ILPD dataset containing the data of Indian Liver Patients in their study. MLP, SVM, LR, DT-CART, and LGBM machine learning methods have been used in the study. It has been reported that the highest diagnostic success is 82.12% with the LGBM machine learning method. Close to the LGBM algorithm, DT-CART, with an 81.13% success rate, and MLP are the second highest-performing methods. According to the sensitivity criterion, the highest rate has been obtained from the LR method, at 95.40%. When the results evaluated according to the precision measure, DT-CART is the most successful method, with 95.40%. According to the F-measure, MLP is the best method, with a rate of 86.81%. When the related studies in this field are analyzed, it is stated that the LGBM machine-learning method has not been applied to the ILPD dataset before (Saygın and Baykara 2021).

Tokala has been used a dataset with liver disease in their study. This dataset has been applied to various classification algorithms such as LR, K-NN, and SVM. According to the findings, both LR and KNN techniques can achieve significant accuracy, but LR has a high sensitivity. It can be concluded that LR is a suitable strategy for disease prediction. A new feature model has been proposed, including Random Forest, SVM, J48, Bayesian Net, and MLP classification methods. When the accuracy of the ML method results is compared, it is stated that the Random Forest method provides better accuracy than LR, SVM, and nearest neighbor methods (Tokala et al., 2023).

Yan et al. have been developed a machine learning model to differentiate non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD) from non-alcoholic steatohepatitis (NASH) and compared five different machine learning algorithms using clinical data from 259 patients. The XGBoost algorithm is reported to achieve the highest accuracy rate of 95% (Yan et al., 2024).

Chauhan et al. in their study on liver cancer risk estimation has been compared AdaBoost, XGBoost,

Gradient Boosting and Logistic Regression algorithms, stating that Logistic Regression achieved the highest accuracy and emphasized the significance of specific biomarkers like age, alkaline phosphatase, and aspartate aminotransferase in predicting liver cancer risk (Chauhan et al., 2025).

Carnazzo et al. have been used XGBoost and Explainable AI methods in a study on non-invasive staging of chronic liver diseases (CLD). In their study, they have been reported that laminin (LN), collagen-III N-peptide (PIIIP N-P) and collagen-IV (C-IV) levels, which are ECM markers, are important markers in liver fibrosis stage and the XGBoost model has reached an accuracy ratio 87% (Carnazzo et al., 2025).

Qiu et al. have been developed a machine learning model to predict 28-day prognosis in acute-chronic liver failure (ACLF) patients. They have been identified important variables using LASSO regression and have been demonstrated that achieved the highest performance with the XGBoost algorithm. They also stated that the model is more successful than existing clinical scoring systems (Child-Pugh, MELD, CLIF-SOFA, etc.) and could be used in patient follow-up (Qiu et al., 2024).

Panwar used machine learning algorithms such as Logistic Regression, Decision Tree, Support Vector Machine, Naive Bayes, and Random Forest on the (ILPD) dataset. The performance of different classification techniques on different measurement techniques has evaluated, including accuracy, precision, recall, and specificity. It has been reported that SVM, DT, RF, LR, and NB had 74%, 72%, 72%, 72%, 71%, and 57% accuracy, respectively. The results of the analysis indicated that SVM achieved the highest accuracy. Furthermore, study focuses on using clinical data for liver disease prediction and explores different ways of representing such data through this study (Panvar et al., 2021).

3. Materials and Methods

This study is based on the "ILPD (Indian Liver Patient Dataset)" dataset available at the UCI Machine Learning Repository (UCI Machine Learning Repository). A total of 583 patients have been sampled, and it contains clinical and laboratory data of these patients. In the dataset, 416 people are labeled as liver patients, while 167 people are labeled as healthy individuals. The dataset has been split into an 80% training set and a 20% test set, and this split has been made reproducible by setting the random state parameter to 42. For model training for liver disease diagnosis, machine learning is applied to the original dataset with classification algorithms such as Random Forest (RF), Logistic Regression (LR), Support Vector Machine (SVM), Decision Tree (DT), K-Nearest Neighbors (KNN), XGBoost and AdaBoost. Feature selection and normalization procedures have been performed to improve model performance. This step has been carried out by considering attributes including age, total bilirubin, direct bilirubin, alkaline phosphatase, alanine aminotransferase, total protein, albumin, albumin/globulin ratio, and patient information. After feature selection and normalization, the models have been retrained, and their accuracy performance has been improved. All machine learning operations have been performed in the JupyterLab environment using Python programming language.

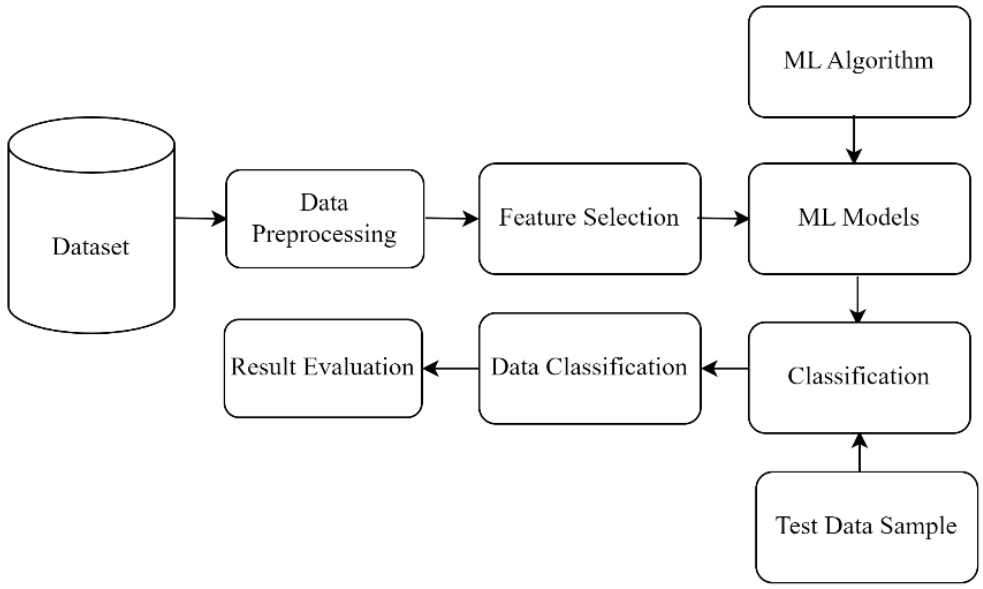


Figure 1. Process Flow Chart

The dataset used has been used in studies on the diagnosis of liver diseases in Indian patients. It is available in the UCI machine learning repository under the name ILPD. A total of 583 patients are sampled in the dataset, 416 with liver disease and 167 healthy patients. These sampled patients consisted of 441 males and 142 females. There are 11 features in total in the dataset. There are 10 of them as features, and 1 of them indicates whether the disease is present or not. Additional information about the dataset is given in Table 1.

It has been determined that there is missing data in the "A/G Ratio" variable because of the activities carried out to understand the data set. In order not to lose the data or disrupt its integrity, the missing data have been filled by averaging the other records. It is presented in Table 2.

The basic statistical characteristics of the data set, its general distribution, central tendency and a prediction for the spread of the distribution are presented in Table 3.

Table 1. Data Set Properties

Features	Data Type
Age	Numeric
Gender	Categorical
TB	Numeric
DB	Numeric
AlkPhos	Numeric
Sgpt	Numeric
Sgot	Numeric
TP	Numeric
Albumin	Numeric
A/G Ratio	Numeric
Is_Patient	Numeric

The distribution of women and men in the dataset is presented in Figure 2, with a male-dominated distribution. According to gender and age distribution, it is observed that the prevalence of liver disease is higher in the 35-60 age range and in men and is presented in Figure 3.

Table 2. Data Set Sample

	age	gender	tb	db	Alkphos	sgpt	Sgot	tp	albumin	a/g_ratio	is_patient
1	65	Female	0.7	0.1	187	16	18	6.8	3.3	0.90	1
2	62	Male	10.9	5.5	699	64	100	7.5	3.2	0.74	1
3	62	Male	7.3	4.1	490	60	68	7.0	3.3	0.89	1
4	58	Male	1.0	0.4	182	14	20	6.8	3.4	1.00	1
5	72	Male	3.9	2	195	27	59	7.3	2.4	0.40	1

Table 3. Statistical Distribution

	age	tb	db	Alkphos	sgpt	sgot	tp	albumin	a/g_ratio	is_patient
count	583	583	583	583	583	583	583	583	583	583
mean	44.746	3.298	1.486	290.576	80.713	109.910	6.483	3.141	0.947	0.713
std	16.189	6.209	2.808	242.937	182.620	288.918	1.085	0.795	0.318	0.452
min	4.000	0.400	0.100	63.000	10.000	10.000	2.700	0.900	0.300	0.000
25%	33.000	0.800	0.200	175.500	23.000	25.000	5.800	2.600	0.700	0.000
50%	45.000	1.000	0.300	208.000	35.000	42.000	6.600	3.100	0.947	1.000
75%	58.000	2.600	1.300	298.000	60.500	87.000	7.200	3.800	1.100	1.000
max	90.000	75.00	19.700	2110.000	2000.000	4929.000	9.600	5.500	2.800	1.000

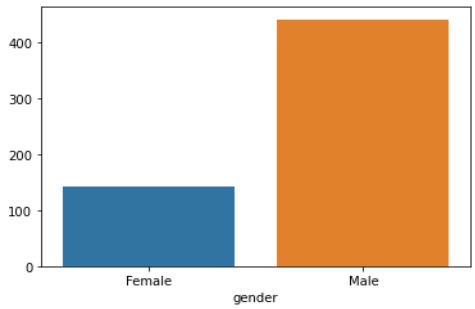


Figure 2. Female Male Ratio

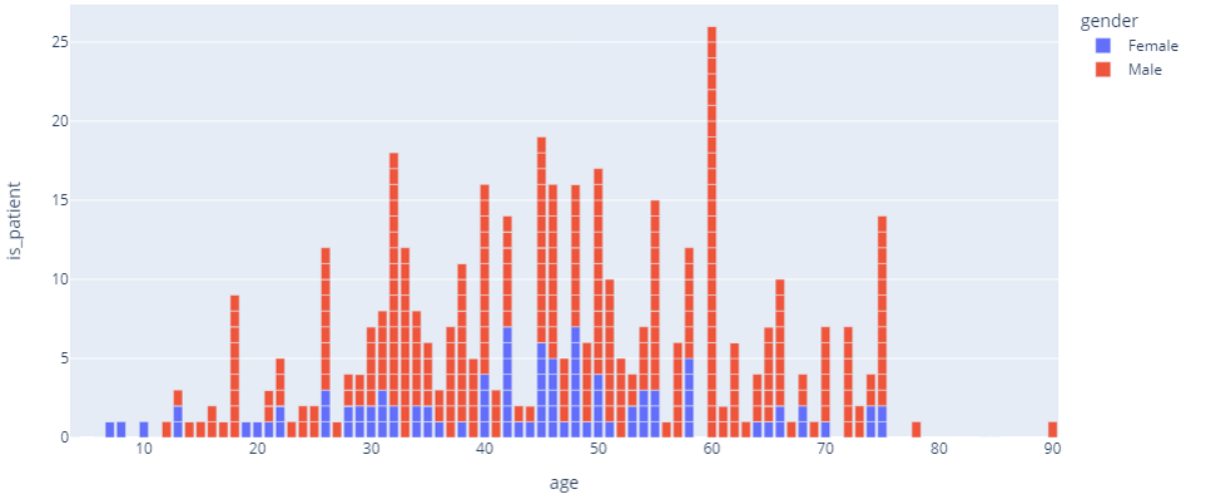


Figure 3. Liver Disease by Gender and Age

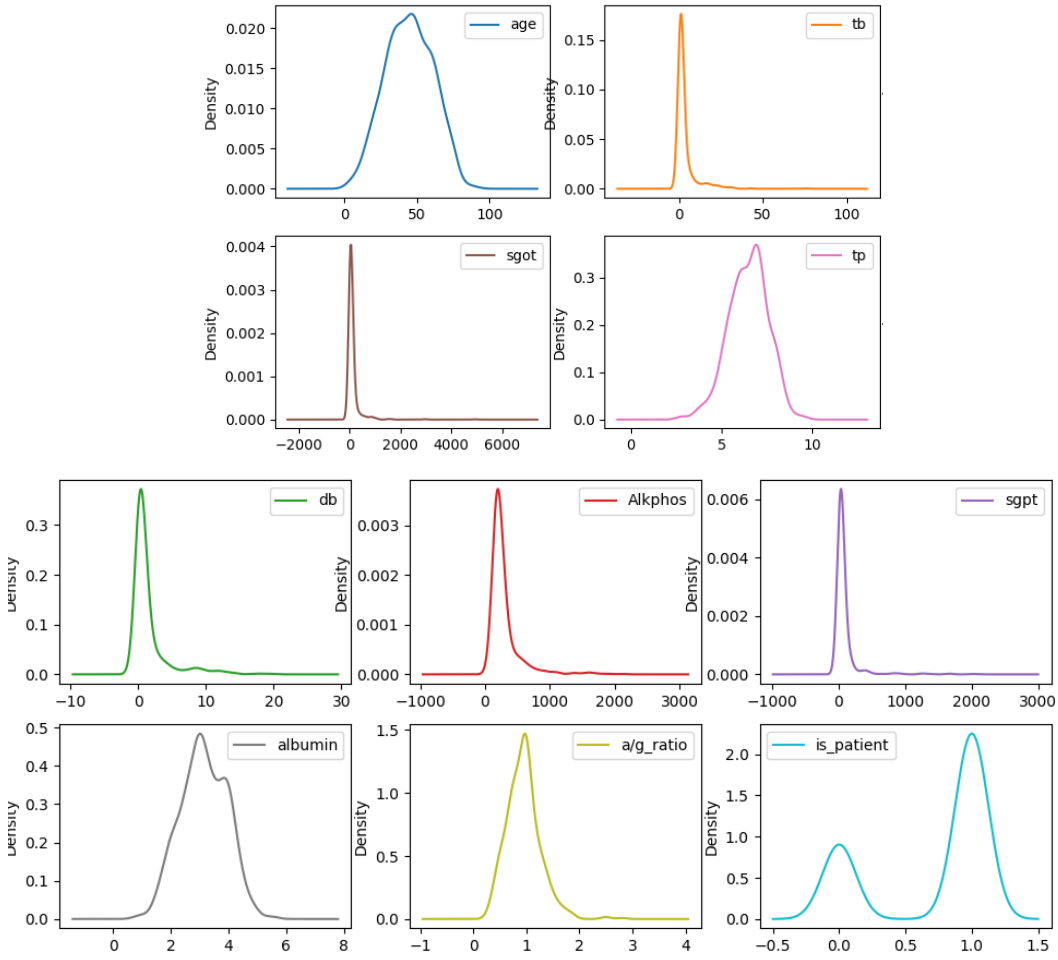


Figure 4. Attributes Distribution

The frequency distribution analysis performed on the obtained data set explains the differences between the attributes of the patients. As a result of this analysis, it has been observed that age (age), total protein (tp), albumin, and albumin/globulin ratio (a/g_ratio) variables have a normal distribution. In contrast, total bilirubin (tb), direct bilirubin (db), alkaline phosphatase (alkphos), SGOT (sgot), and SGPT (sgpt) variables have a right skewed distribution. These findings show that patients exhibited a more homogeneous distribution in terms of age, total protein level, albumin amount, and albumin/globulin ratio. However, there is a significant skewness in total bilirubin, direct bilirubin, alkaline phosphatase, SGOT, and SGPT values related to liver function, which are presented in Figure 4. In the relationship between the correlation matrix and the attributes, there is a strong positive correlation between total bilirubin and direct bilirubin (0.87). This indicates that these two values are closely

linked. The correlation between age and other variables is generally low. The highest negative correlation is seen between age and albumin at -0.27. This may indicate that albumin levels generally decrease with increasing age. The correlation between alkaline phosphatase and SGPT is low. This indicates that these two values are independent of each other. There is a strong positive correlation between SGPT and SGOT (0.79). This indicates that these two values are closely linked. There is a strong positive correlation between total protein and albumin (0.78). This indicates that the total protein level usually parallels the albumin level. There is a strong positive correlation between albumin and a/g_ratio (0.69). This indicates that albumin level is closely related to a/g ratio. It is presented in Figure 5. The significance levels between some attributes have been measured, and the results are presented in Table 3.

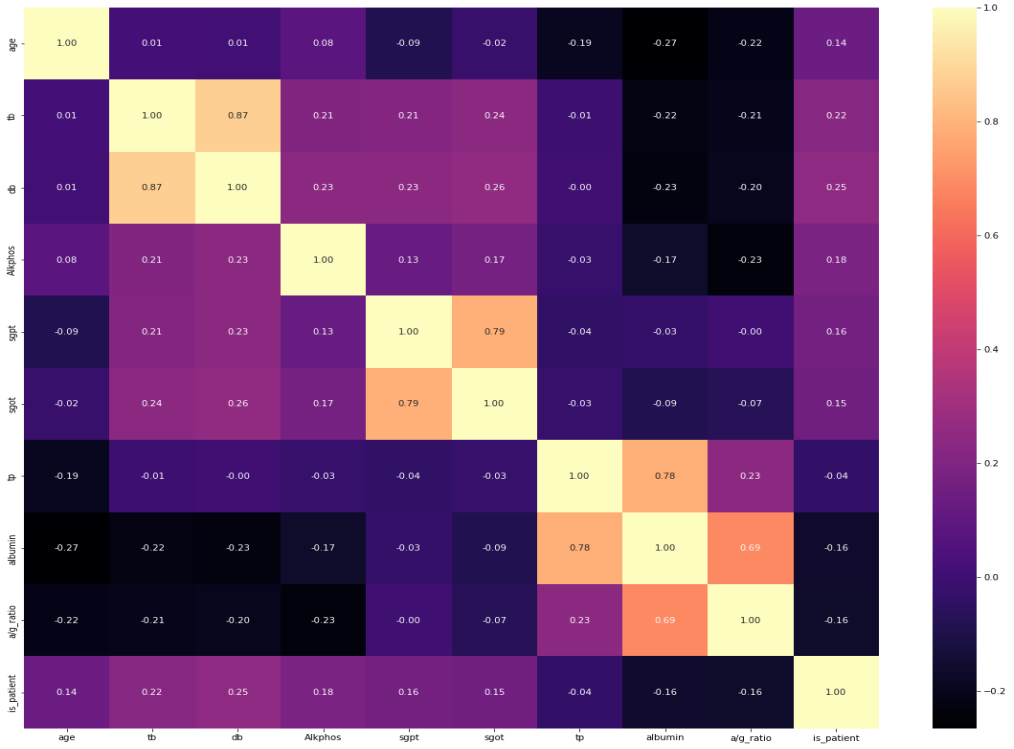


Figure 5. Correlation matrix

Table 3. Significance Levels Between Attributes

	Attribute	Attribute	Correlation	P-Value	Result
0	sgot	sgpt	0.791966	1,35E-120	Significant
1	sgot	tb	0.237831	6,11E-03	Significant
2	sgot	db	0.257544	2,76E-04	Significant
3	sgot	albumin	-0.085290	3,95E+04	Significant
4	sgot	tp	-0.025645	5,37E+05	Not Significant
5	sgot	a/g_ratio	-0.070024	9,12E+04	Not Significant
6	sgpt	tb	0.214065	1,81E-01	Significant
7	sgpt	db	0.233894	1,10E-02	Significant
8	sgpt	albumin	-0.029742	4,74E+05	Not Significant
9	sgpt	tp	-0.042518	3,05E+05	Not Significant
10	sgpt	a/g_ratio	-0.002374	9,54E+05	NotSignificant
11	tb	db	0.874618	7,87E-179	Significant
12	tb	albumin	-0.222250	5,87E-02	Significant
13	tb	tp	-0.008099	8,45E+05	Not Significantt
14	tb	a/g_ratio	-0.206159	5,14E-01	Significant
15	db	albumin	-0.228531	2,40E-02	Significant
16	db	tp	-0.000139	9,97E+05	Not Significantt
17	db	a/g_ratio	-0.200004	1,13E+00	Significant
18	albumin	tp	0.784053	1,93E-116	Significant
19	albumin	a/g_ratio	0.686322	2,17E-76	Significant
20	tp	a/g_ratio	0.233904	1,10E-02	Significant

The combination of Feature Selection and Normalization Filter preprocessing steps is a strategy to optimize the training of the model as Table 4. Correlation-based feature selection helps the model focus on essential features, while normalization corrects for scale differences in the dataset, allowing the model to produce more balanced and consistent results. In this way, the learning accuracy of classification methods can be increased, and more reliable predictions can be made.

Table 4. Feature Selection

Feature Abbreviation	Description
Age	Age
TB	Total Bilirubin
Sgpt	Alanine Aminotransferase
Sgot	Sgot
TP	Total Protein

4. Model Evaluation and Discussion

The presented machine learning models are evaluated with various success metrics. These metrics allow us to analyze model performance in various aspects. In order to evaluate the performance of each model, a confusion matrix has been calculated. This matrix indicates the accuracy of the model in a 2x2 matrix format by comparing the predictions made with the actual values. Each cell indicates whether the model correctly or incorrectly predicted the positive and negative classes. In this way, essential performance measures such as precision, sensitivity, and F1-Score were obtained (Eyüpoğlu, 2020). The confusion matrix helps to analyze the classification ability of each model in detail and to reach reliable results (Chen et al., 2024; Kistenev et al., 2022; Lampignano et al., 2023; Otesteanu et al., 2024, Yavuz and Eyupoglu, 2020).

TP (True Positive): The number of values classified as 1 that are indeed 1.

FP (False Positive): The number of values that are classified as 1 but are actually 0.

TN (True Negative): The number of values classified as 0 that are actually 0.

FN (False Negative): The number of values that are classified as 0 but are actually 1.

Precision: Returns the proportion of correctly classified data.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

F-measure: Returns the harmonic mean of Precision and Recall values.

$$F - Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

Sensitivity: Returns the ratio of data classified as positive to the actual positive data.

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FP}$$

Specificity: Returns the ratio of data classified as negative to actual negative data.

$$\text{Specifity} = \frac{\text{TN}}{\text{TN} + \text{FP}}$$

Accuracy: Returns the accuracy value itself and is calculated as follows.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}}$$

The effects of feature extraction and normalization on performance before and after model training have been evaluated. In Table 5, the success rates before feature extraction and normalization are compared with the rates after these operations on the dataset.

Table 5. Effect of Normalization Process on Model Results

ML Models	Accuracy Rates	
	Before Normalization	After Normalization
Logistic Regression-LR	75%	80%
Random Forest - RF	73%	76%
Decision Tree- DT	71%	68%
KNeighbors Classifier - KNN	66%	56%
XGBClassifier - XGB	71%	72%
AdaBoost Classifier-ADABC	70%	75%
Ensemble-BaggingRegressor	71%	72%

Feature extraction and normalization played an essential role in improving the overall accuracy and performance of the model. The success rates obtained in the first case are lower than those observed after feature extraction and normalization. This is because the features in the dataset have not been scaled and significantly modified. Feature extraction allowed the model to focus on more important and salient features, while normalization helped to represent different attributes at similar scales. As a result, these processes allowed the model to generalize better and provide more reliable results in real-world applications. Table 6 shows the comparative model results.

In this study the KNN, DT and RF algorithms have been shown lower performance compared to other models. The accuracy rate of the KNN algorithm is 56% and the main reasons for this low performance are the insufficient

scaling process and data imbalance. The selection of the number of neighbors as 2 is estimated to increase the sensitivity of the model to noise and reduce its generalization ability. The DT algorithm has an accuracy rate of 68%. Possible reasons are that the model overfits the training data and underperforms on the test data due to its tendency to overfit. One of the reasons that the Random Forest algorithm could not reach the expected level with an accuracy of 76% is that the number of trees that are used is considered to be the default values (100) and the feature selection is not optimized. There are recommendations for improvement strategies for future work to increase the performance of these models. Data scaling methods should be applied and class imbalance should be addressed by methods using SMOTE. In order to prevent the DT model from overfitting the maximum depth should be limited and pruning techniques should be used. In the RF model's generalization ability of the model can be improved by increasing the number of trees and more significant variables can be included in the model through feature selection.

Table 6. Model Performance Metrics

ML Models	Performance Measures				
	Accuracy	Precision	F-Score	Sensitivity	Specificity
Logistic Regression-LR	80%	0.796	0.882	0.988	0.266
Random Forest - RF	76%	0.817	0.844	0.873	0.433
Decision Tree- DT	68%	0.777	0.790	0.804	0.333
KNeighborsClassifier- KNN	56%	0.790	0.657	0.563	0.566
XGBClassifier-XGB	72%	0.831	0.811	0.793	0.533
AdaBoost Classifier-ADABC	75%	0.862	0.826	0.793	0.633
Ensemble-BaggingRegressor	72%	0.795	0.822	0.850	0.366

Table 5 shows that the LR model performs the best with an accuracy of 80%, while the precision is 79.6% and the sensitivity is 98.8%. This demonstrates the model's high accuracy in positive predictions and its effectiveness in detecting true positive cases. The RF model stands out with an accuracy of 76% and a precision of 81.7%. This highlights the model's accuracy in positive predictions as well as its ability to recognize true positive cases successfully. The DT model, which has an accuracy rate of 68%, shows a more uneven performance in terms of precision and sensitivity compared to the other models. With an accuracy of 56%, KNN performs less well compared to the others. However, the sensitivity value of 56.3% represents the model's success in detecting positive cases. With 72% accuracy, the XGB model stands out for its high precision (83.1%) and specificity (79.3%). This highlights the model's accuracy in positive predictions and its ability to classify negative cases accurately. With an accuracy of 75%, ADABC also performs strongly on other metrics. High values of precision (86.2%) and specificity (79.3%) strongly support the model's classification ability. In addition, the Ensemble-Bagging Regressor method combines the outputs of multiple models to improve overall performance, achieving 72% accuracy, 79.6% precision and 85% sensitivity. It demonstrates a balanced and robust classification capability that leverages the strengths of ensemble learning to improve model stability.

5. Conclusions

This study comprehensively evaluates the performance of different models through classification experiments on the ILDP dataset. The obtained results contribute to the understanding of the important factors affecting model performance. Future work could include an in-depth investigation of different metrics and parameters to improve model performance further. In this context, research on larger datasets, feature engineering, and more complex model architectures can increase the potential to optimize classification performance. The results of this study inspire future research in the early diagnosis and treatment of ILDP or similar diseases.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft.

Author-2: Conceptualization, investigation, methodology and software, supervision and writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

6. References

Calleja-Panero, J. L., Esteban Mur, R., Jarque, I., Romero-Gómez, M., Group, S. R., García Labrador, L., & González Calvo, J. (2024). Chronic liver disease-associated severe thrombocytopenia in Spain: Results from a retrospective study using machine learning and natural language processing. Gastroenterologia y Hepatologia, 47(3), 236–245. https://doi.org/10.1016/j.gastrohep.2023.05.010

Carnazzo, V., Pignalosa, S., Tagliaferro, M., Gragnani, L., Zignego, A. L., Racco, C., ... & Basile, U. (2025). Exploratory study of extracellular matrix biomarkers for non-invasive liver fibrosis staging: A machine learning approach with XGBoost and explainable AI. Clinical Biochemistry, 135, 110861.

Chauhan, R., Sahi, A., Kaur, H., & Avasthi, S. (2025). Machine learning algorithm approach in risk prediction of liver cancer. In Machine Learning Models and Architectures for Biomedical Signal Processing, Academic Press, 547-570.

Chen, W., Zhang, Y. J., Wu, W., Yang, H., & Huang, W. (2024). Machine learning-based predictive model for abdominal diseases using physical examination datasets. Computers in Biology and Medicine, 173, 108249. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108249

Cohen, J. C., Horton, J. D., & Hobbs, H. H. (2011). Human fatty liver disease: old questions and new insights. Science, 332(6037), 1519–1523.

Ersoy, O. (2012). Karaciğer enzim yüksekliğinin değerlendirilmesi. Ankara Medical Journal, 12(3), 129–135

Eyupoglu, C., & Karakuş, O. (2024). Novel CAD diagnosis method based on search, PCA, and AdaBoostM1 techniques. Journal of Clinical Medicine, 13(10), 2868.

Eyüpoğlu, C. (2020). Kronik böbrek hastalığının erken tanısı için yeni bir klinik karar destek sistemi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20), 448-455.

Guo, W., Shi, Z., Zeng, T., He, Y., Cai, Z., & Zhang, J. (2022). Metabolic study of aristolochic acid I-exposed mice liver by atmospheric pressure matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry imaging and machine learning. Talanta, 241, 123261. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123261

Haeng Hur, M., Cheuk-Fung Yip, T., Up Kim, S., Woong Lee, H., Ah Lee, H., Lee, H.-C., Lai-Hung Wong, G., Wai-Sun Wong, V., Yong Park, J., Hoon Ahn, S., Kyung Kim, B., Young Kim, H., Seok Seo, Y., Shin, H., Park, J., Ko, Y., Park, Y., Bin Lee, Y., Jong Yu, S., … Lee, J.-H. (2025). Journal Pre-proof A machine learning model to predict liver-related outcomes after the functional cure of chronic hepatitis B including those for text and data mining, AI training, and similar technologies. Journal of Hepatology. 82, 2, 235-244 https://doi.org/10.1016/j.jhep.2024.08.016

Hashem, E. M., & Mabrouk, M. S. (2014). A study of support vector machine algorithm for liver disease diagnosis. American Journal of Intelligent Systems, 4(1), 9–14.

Kistenev, Y. V., Vrazhnov, D. A., Shnaider, E. E., & Zuhayri, H. (2022). Predictive models for COVID-19 detection using routine blood tests and machine learning. Heliyon, 8, 10, e11185 https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11185

Lampignano, L., Tatoli, R., Donghia, R., Bortone, I., Castellana, F., Zupo, R., Lozupone, M., Panza, F., Conte, C., & Sardone, R. (2023). Nutritional patterns as machine learning predictors of liver health in a population of elderly subjects. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 33(11), 2233–2241. https://doi.org/10.1016/j.numecd.2023.07.009

Maria Jesi, P., & Antony Asir Daniel, V. (2024). Differential CNN and KELM integration for accurate liver cancer detection. Biomedical Signal Processing and Control, 95, 106419. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106419

Otesteanu, C. F., Caldelari, R., Heussler, V., & Sznitman, R. (2024). Machine learning for predicting Plasmodium liver stage development in vitro using microscopy imaging. Computational and Structural Biotechnology Journal, 24, 334–342. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.04.029

Pan, A., Mukhopadhyay, S., & Samanta, S. (2022). Liver disease detection: evaluation of machine learning algorithms performances with optimal thresholds. International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics (IJHISI), 17(2), 1–19.

Priya, M. B., Juliet, P. L., & Tamilselvi, P. R. (2018). Performance analysis of liver disease prediction using machine learning algorithms. Int. Res. J. Eng. Technol, 5(1), 206–211.

Qiu, S., Zhao, Y., Hu, J., Zhang, Q., Wang, L., Chen, R., ... & Han, T. (2024). Predicting the 28-day prognosis of acute-on-chronic liver failure patients based on machine learning. Digestive and Liver Disease, 56(12), 2095-2102.

Saygın, E., & Baykara, M. (2021). Karaciğer yetmezliği teşhisinde özellik seçimi kullanarak makine öğrenmesi yöntemlerinin başarılarının ölçülmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(2), 367–377.

Tokala, S., Hajarathaiah, K., Gunda, S. R. P., Botla, S., Nalluri, L., Nagamanohar, P., Anamalamudi, S., & Enduri, M. K. (2023). Liver disease prediction and classification using machine learning techniques. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14, 2. https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140299

Wei, H., Luo, S., Bi, Y., Liao, C., Lian, Y., Zhang, J., & Huang, Y. (2024). Plasma microRNA-15a/16-1-based machine learning for early detection of hepatitis B virus-related hepatocellular carcinoma. Liver Research, 8(2), 105–117. https://doi.org/10.1016/j.livres.2024.05.003

Wu, B., & Moeckel, G. (2023). Application of digital pathology and machine learning in the liver, kidney and lung diseases. Journal of Pathology Informatics, 14, 100184. https://doi.org/10.1016/j.jpi.2022.100184

Yan, Y., Chen, Q., Xiang, Z., Wang, Q., Long, Z., Liang, H., Ameer, S., Zou, J., Dai, X., & Zhu, Z. (2024). Amino acid metabolomics and machine learning-driven assessment of future liver remnant growth after hepatectomy in livers of various backgrounds. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 249, 116369. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2024.116369

Yan, Y., Gan, D., Zhang, P., Zou, H., & Li, M. (2024). A machine learning-based predictive model discriminates nonalcoholic steatohepatitis from nonalcoholic fatty liver disease. Heliyon, 10(21), e38848. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38848

Yavuz, E., & Eyupoglu, C. (2020). An effective approach for breast cancer diagnosis based on routine blood analysis features. Medical & Biological Engineering & Computing, 58(7), 1583-1601.

Yu, R., Huang, Y., Hu, X., & Chen, J. (2024). Analysis of machine learning based integration to identify the crosslink between inflammation and immune response in non-alcoholic fatty liver disease through bioinformatic analysis. Heliyon, 10(14), e32783. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32783

Internet References

1-UCI Machine Learning Repository. Retrieved September 18, 2024, from https://archive.ics.uci.edu/

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367 **DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1576154**
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045401 (838-845) AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045401 (838-845)

Nar Suyu ve Nar Ekşisi Örneklerinin HMF İçerikleri, Antioksidan Aktivite ve Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 02.11.2024
Kabul/Accepted: 20.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Determination of HMF Content, Antioxidant Activity and Physicochemical Properties of Pomegranate Juice and Molasses

Tuğça BİLENLER KOÇ[1], Ülkühan BAĞIŞ[2*], İhsan KARABULUT[1]

[1] *İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye*
[2] *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Zara Ahmet Çuhadaroğlu Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Sivas, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada ulusal düzeyde satışı olan beş farklı marka nar ekşisi örnekleri Malatya'da (Türkiye) bulunan yerel marketlerden temin edilmiştir. Ayrıca manavdan temin edilen nardan elde edilen taze nar suyu çalışmada kontrol örneği olarak kullanılmıştır. Örnekler antioksidan kapasite, bazı fizikokimyasal özelikleri ve hidroksimetil furfural (HMF) içerikleri bakımından incelenmiştir. Tüm örneklerin güçlü antioksidan aktivite gösterdiği belirlenmiştir. Taze nar suyunun toplam fenolik içeriği (86.98 mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/g kuru ağırlık (KA), antosiyanin (95.98 mg/L) ve askorbik asit (0.55 mg/mL) miktarlarının tüm nar ekşisi örneklerine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (sırası ile 15.56-22.32 mg GAE/g KA, 3.77-24.37 mg/L ve 0.03-0.04 mg/mL). Daha konsantre olmaları nedeni ile nar ekşisi örneklerinde daha yüksek miktarlarda olmak üzere tüm örneklerde glikoz, fruktoz ve sukroz belirlenmiştir. Sitrik asidin tüm örneklerde baskın organik asit olduğu görülmüştür. Hem taze nar suyu hem de nar ekşisi örneklerinde 13 fenolik bileşik belirlenmiştir. Bunlar arasında gallik asit, prosiyanidin B1 ve epikateşin miktar olarak öne çıkan fenolik bileşikler olarak belirlenmiştir. Taze nar suyunda tespit edilen tüm fenolik bileşiklerin nar ekşisi örneklerine kıyasla daha yüksek miktarlarda oldukları gözlemlenmiştir. En düşük HMF miktarı taze nar suyunda (0.15 mg/kg KA) belirlenirken, 5 ticari nar ekşisi örneklerinin HMF içeriğinin (104.86-426.02 mg/kg KA) TS 12720 standardına (50 mg/kg KA) uyum göstermediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Antioksidan; Fenolik bileşik; HMF; Nar ekşisi*

Abstract

In this study, five different brands of pomegranate molasses samples with national sales were purchased from local markets in Malatya, Turkey. Additionally, fresh pomegranate juice obtained from pomegranates ourchased from the grocery store was used as a control sample in the study. The samples were investigated for their antioxidant capacity, some physicochemical properties, and hydroxymethylfurfural (HMF) content. It was found that all samples exhibited strong antioxidant activity. The total phenolic content of fresh pomegranate juice (86.98 mg gallic acid equivalent (GAE)/g dry weight (DW), anthocyanin (95.98 mg/L), and ascorbic acid (0.55 mg/mL) levels were higher than those of all pomegranate molasses samples (ranging from 15.56-22.32 mg GAE/g DW, 3.77-24.37 mg/L, and 0.03-0.04 mg/mL, respectively). In all samples, glucose, fructose, and sucrose were detected, with higher amounts in pomegranate molasses samples due to their higher concentration. Citric acid was identified as the dominant organic acid in all samples. Thirteen phenolic compounds were identified in both fresh pomegranate juice and pomegranate molasses samples, with gallic acid, procyanidin B1 and epicatechin standing out as the most abundant phenolic compounds. It was observed that the amounts of all phenolic compounds detected in fresh pomegranate juice were higher than those found in pomegranate molasses samples. While the lowest HMF amount was determined in fresh pomegranate juice (0.15 mg/kg DW), it was found that the HMF content in five commercial pomegranate molasses samples (104.86-426.02 mg/kg DW) did not comply with the TS 12720 standard (50 mg/kg DW).

Keywords: *Antioxidant; Phenolic compound; HMF; Pomegranate molasses*

1. Giriş

Vücut fonksiyonlarının düzenli çalışması ve aynı zamanda bir takım dejeneratif hastalıklara (kanser, kardiyovasküler hastalıklar gibi) yakalanma riskinin azaltılması için günlük diyetlerde meyve ve sebze tüketimi oldukça önemlidir. Punicaceae ailesine ait olan nar (*Punica granatum* Linn.) bilinen en eski meyvelerden biridir (Hmid vd. 2017). Nar bileşiminde yer alan biyoaktif bileşikler sebebi ile (organik asit, şeker, vitamin, polisakkarit, polifenol, mineral maddeler, fenolik bileşikler ve antosiyanin) besin değerinin yanı sıra antioksidan kapasitesi bakımından da dikkat çekmektedir (Karakaplan ve Özcan 2017; İncedayı

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ülkühan BAĞIŞ e-posta/e-mail: ulkuhanbagis@cumhuriyet.edu.tr

vd. 2010). Nar yeşil çay ya da kırmızı şaraptan üç kat, üzüm ve portakal suyundan altı-sekiz kat daha yüksek antioksidan aktiviteye sahiptir. Meyve bileşimi tip, büyüme koşulları, iklim, olgunluk seviyesi ve depolama koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Karakaplan ve Özcan 2017; Elfalleh vd. 2009). Sağlık için önemli kimyasallara ve eşsiz besinsel kaliteye sahip olan nar süper meyveler olarak adlandırılan bir grubun içinde yer almaktadır. Bu sebeple de dünya genelinde ve ülkemizde nar meyvesinin ve ürünlerinin tüketimi yıldan yıla artmaktadır (Oguz vd. 2023). Türkiye'de 2022 yılında nar üretim miktarı 681 bin ton olarak belirtilmiştir (Binici vd. 2023). Sofralık olarak tüketim nar üretiminin büyük bir kısmını karşılamaktadır. Bunun yanı sıra nar meyvesinden reçel, şarap, likör, gıda renklendiricisi, aroma zenginleştirici ve nar ekşisi de üretilmektedir (El Hosry vd. 2023; İncedayı vd. 2010). Nar ekşisi, günümüzde hala geleneksel yönteme bağlı kalınarak, herhangi bir katkı maddesi ya da şeker eklemeden sadece kaynatarak basitçe konsantre etme işlemi ile üretilmektedir. Üretim aşamasında meyve içerisindeki şeker karamelize olmakta, su buharlaşarak uzaklaşmaktadır (İncedayı vd. 2010; Oguz vd. 2023). Nar suyuna kıyasla nar ekşisi daha konsantre bir yapıya sahiptir ve spesifik mineral içeriği daha yüksektir. Bu özellikleri temelinde nar ekşisi nar suyuna kıyasla daha besleyici ürün olarak değerlendirilmektedir (İncedayı vd. 2010). Ancak nar ekşisi üretiminde bir takım olumsuz durumlar da oluşabilmektedir. Örneğin nar suyunun doğal yapısında bulunmayan, hidroksimetil furfural (HMF) bileşiği üretim esnasında uygulanan ısıl işlem sonucu açığa çıkabilmektedir. HMF şekerin dehidrasyonu ve amino asitlerle reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Ayrıca bu ürünlerin oluşumuna uygunsuz üretim ve depolama koşulları da katkı yapabilmektedir. Bu sebeplerle özellikle ticari olarak üretimi yapılan nar ekşisi ürünlerin içeriğinin belirlenmesine yönelik çalışmaların yapılması önem arz etmektedir (Oguz vd. 2023).

Literatürde Türkiye'nin de içinde olduğu farklı ülkelerden toplanan nar meyvesinin (Çam vd. 2009), ticari nar suyunun (Gil vd. 2000) ve nar ekşisinin (İncedayı vd. 2010) bazı fizikokimyasal özellikleri ve antioksidan kapasitesinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, çalışmaya konu olan ticari nar ekşisi örneklerinin üretim koşullarının etkisi ile hem bileşim özelliklerindeki değişimin hem de istenmeyen son ürün olan HMF miktarındaki gelişimin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda bölgede ticari olarak satılan 5 farklı marka nar ekşisi örneklerinde ve taze sıkılan nar suyunda antioksidan aktivite, toplam fenolik içerik, antosiyanin miktarı, şeker, organik asit, bireysel fenolik içerik miktarlarının yanı sıra HMF miktarı da belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada, 5 farklı marka nar ekşisi yerel marketten satın alınmıştır. Ayrıca, analizlerden hemen önce taze meyveden nar suyu sıkılarak kontrol örneği olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm kimyasal ve standartlar aksi belirtilmedikçe Sigma-Aldrich'den (Steinheim, Germany) temin edilmiştir.

2.2. Metot

2.2.1. Antioksidan aktivite, toplam fenolik içerik (TFİ) ve antosiyanin miktarı

Örneklerin antioksidan aktivitesi spektrofotometrik olarak 2,2-diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) reaktifi ile belirlenmiştir. Kısaca, bilinen konsantrasyonda metanolde seyreltilen örnek (100 µL) DPPH metanol reaktifi (1.9 mL) ile karıştırıldıktan sonra karanlıkta 30 dk inkübasyona bırakılmış ve 520 nm dalga boyunda absorbans okuması yapılmıştır. Nar suyu seyreltilmeden doğrudan kullanılmıştır. DPPH serbest radikalin yüzde inhibisyon hesaplanmasında aşağıda verilen denklem (1) kullanılmıştır (İncedayı vd. 2010).

$$\text{Yüzde İnhibisyon } (\%) = [(\text{AK} - \text{AN})/\text{AK}]\text{x}100 \qquad (1)$$

AK = Kontrol absorbans değeri

AN = Numune absorbans değeri

Toplam fenolik içerik (TFİ) Folin-Ciocalteu metodu ile belirlenmiştir (Karabulut vd. 2018). Nar ekşisi örnekleri bilinen konsantrasyonlarda metanolde seyreltilmiş ve 100 µL örnek 1 mL Folin-Ciocalteu reaktifi, 400 µL deiyonize su ve 1 mL sodyum karbonat (%7) ile karıştırılarak karanlıkta 90 dk inkübasyona bırakılmıştır. Süre sonunda tüm örneklerin spektrofotometrede (Shimadzu UV-1700) 725 nm dalga boyunda absorbansları ölçülmüştür. Nar suyu seyreltilmeden doğrudan kullanılmıştır. TFİ hesaplamasında bilinen konsantrasyonda gallik asit standardı kullanılarak hazırlanan kalibrasyon eğrisi kullanılmıştır. Sonuçlar mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/g kuru ağırlık (KA) olarak ifade edilmiştir. Antosiyanin miktarı pH diferansiyel spektrofotometrik bir teknik ile ölçülmüştür. Örnekler 0.25 M potasyum klorür (pH 1) ve 0.4 M sodyum asetat tamponu (pH 4.5) ile seyreltildikten sonra 520 ve 700 nm dalga boylarında absorbansları belirlenmiştir. Aşağıda verilen denklem (2) ile absorbans değerleri hesaplanmıştır (Lee vd. 2005).

$$\text{A} = [(\text{A520} - \text{A700})\ \text{pH1.0} - (\text{A520} - \text{A700})\ \text{pH4.5}] \qquad (2)$$

Antosiyanin miktarı ise siyanidin-3-glukozit eşdeğeri olarak aşağıdaki denklem (3) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Antosiyanin içeriği } (mg/L) = (\text{A x MA x DF x V x1 00})/(\varepsilon \text{ x I x m}) \quad (3)$$

A absorbans, MA moleküler ağırlık (MW= 449,2 g/mol), DF dilüsyon faktörü, **ε** molar absorptivite (**ε**= 26900 L/cm mol), V solventin mL cinsinden hacmi, l ise yol uzunluğu (cm), m örnek miktarıdır (g).

2.2.2. HPLC analizleri

Shimadzu HPLC sistemi gradient pompa (LC-20AR), autosampler (SIL-20A-HT), degasser sistemi (DGU2A5R), kolon fırını (CTO-10AS) ve dedektörler (Diode Array Dedector (DAD, SPD-M20A), Refractive Index Detector (RID-10 A) ve paket yazılım programından oluşmaktadır. Tüm HPLC analizleri 3 tekrarlı olarak yapılmış ve ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir.

Şeker ve organik asit miktarı

Bilinen konsantrasyonda ultra saf su ile seyreltilen örnekler, 4°C'de 25.155 x g hızında 20 dk santrifüj (SL 16R Centrifuge; Thermo-Fisher Scientific, Germany) edilmiş ve 0.45 µm naylon filtreden (Lubitech, Songjiang, China) geçirilerek şeker ve organik asit analizlerinde kullanılmak üzere HPLC viallerine alınmıştır.

Şeker (glikoz, fruktoz ve sukroz ve sorbitol) analizi Sturm vd. (2003) uyguladığı yöntemde bazı değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrım Rezex RCM (300 x 7.8 mm; Phenomenex, Torrance, CA) kolonda, ultra saf suyun mobil faz olduğu, izokratik akışda, 0.6 mL/ dk akış hızında, 80°C kolon sıcaklığında gerçekleşmiştir. Refraktif indeks dedektörü kullanılmıştır. Şekerler ve sorbitol standartları ile hazırlanan 5 noktalı kalibrasyon eğrisi kullanılarak hesaplama yapılmıştır, sonuçlar mg şeker/mL birimi ile ifade edilmiştir.

Organik asitler (malik asit, sitrik asit ve askorbik asit) Rezex ROA column (300 x 7.8 mm; Phenomenex, Torrance, CA) kolon ile Sturm vd. (2003) metoduna bağlı kalarak izokratik olarak belirlenmiştir. Elüsyon 55°C'de, mobil faz olarak 0.005 N H_2SO_4 ile ve 0.5 mL/dk akış hızı ile yapıldı. Kromatogram malik ve sitrik asit için 210 nm, askorbik asit için 245 nm'de görüntülenmiştir. Hesaplama organik asit standartları ile hazırlanan 5 noktalı kalibrasyon eğrisi kullanılarak yapılmış ve sonuçlar mg organik asit/mL olarak ifade edilmiştir.

Fenolik bileşikler

Örnek ekstraksiyonu Kim ve Lee (2002) tarafından tanımlanan yöntemde bazı değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Kısaca, örnek (20 g) üzerine 100 mL metanol/askorbik asit (0,1 g/mL) çözgeni (90:10 h/h) eklenmiş, 2 dk süresince T18 Ultra-Turrax yardımı ile homojenize edilmiştir. Santrifüj (5.580 x g, 5 dk, 4°C) edilen örnek ve 0.45 µm naylon filtreden (Lubitech, Songjiang, China) geçirilerek HPLC vialine alınmıştır.

Fenolik bileşikler Campbell vd. (2013)'nin metoduna bağlı kalınarak analiz edilmiştir. Ayrım İnertsil ODS 3 (250 mm x 4.6 mm, 5 lm; GL Sciences Inc., Tokyo, Japan) kolonunda gerçekleştirilmiştir. Analiz koşulları; kolon sıcaklığı 25°C, mobil faz akış hızı 1 mL/dk'dır. Gradiyent elüsyon ile ayrım gerçekleştirilmiştir. A solventi ultra saf suda %0.1 fosforik asit, B solventi ise asetonitrilde (HPLC grade) %0.1 fosforik asit kullanılmıştır. Toplam 55 dk süren ayrımda uygulanan gradient elüsyon programı; 0. dk'da %92 A %8 B, 4.dk'da %89 A %11 B, 25. dk %65 A %35 B, 30. dk %60 A %40 B, 40. dk %40 A %60 B, 45. dk %65 A %35 B, 50. dk %89 A %11B, 55. dk %92 A %8 B şeklindedir. Kateşin, epikateşin, epigallokateşin, prosiyanidin B1 ve B2 ve gallik asit 280 nm de; p-kumarik asit, neo-klorojenik asit, klorojenik asit ve ferulik asit 320 nm'de, kuersetin 3-β-D-glikozit, kaempferol 3-glukozit ve rutin hidrat 360 nm dalga boyunda DAD dedektörde görüntülenmiştir. Fenolik bileşik standartları ile çizilen kalibrasyon eğrisi kullanılarak sonuçlar mg fenolik bileşik/L olarak ifade edilmiştir.

Hidroksimetil furfural (HMF)

Nar ekşisi ve nar suyunun HMF miktarları HPLC tekniği ile belirlenmiştir (Güncüoğlu ve Gökmen 2013). Örnek üzerine (0.5 g) 1 mL metanol (%70) eklenmiş, vorteks yardımı ile karıştırıldıktan sonra 0.45 µm naylon filtreden (Lubitech, Songjiang, China) geçirilerek HPLC vialine alınmıştır. HPLC sisteminde ayrım İnertsil ODS 3 kolonunda (250 mm x 4.6 mm, 5 lm; GL Sciences Inc., Tokyo, Japan) gerçekleştirilmiştir. Mobil faz olarak 10 mM formik asitli su: asetonitril (90:10) kullanılmıştır. Akış hızı 1 mL/dk olacak şekilde izokratik akış uygulanmıştır. Kolon sıcaklığı 25°C olup, absorbans okuması DAD dedektörde 285 nm'de yapılmıştır. HMF standardının bilinen konsantrasyonları ile çizilen kalibrasyon eğrisi kullanılarak sonuçlar mg HMF/kg kuru ağırlık (KA) olarak ifade edilmiştir.

2.2.3. İstatistik

İstatistiksel değerlendirme SPSS paket program (versiyon 16.0) aracılığı ile yapılmıştır. Örnekler arasındaki farklılıklar $P<0.05$ önem düzeyinde Duncan çoklu karşılaştırma testi ile değerlendirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Antioksidan aktivite, toplam fenolik içerik ve antosiyanin miktarı

Örneklerin antioksidan aktivitesi DPPH radikal süpürme tekniği ile belirlenmiştir (Çizelge 1). Örneklerin antioksidan kapasitesi arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli ($P<0.05$) olup, taze nar suyunun DPPH

radikal süpürme aktivitesi %84.19, ticari nar ekşisi örneklerinin ise %85.24 ile %89.85 aralığında değiştiği saptanmıştır.

Orak (2008) ticari nar suyu ve konsantre edilmiş nar suyunun DPPH tekniği ile antioksidan aktivitesinin sırası ile %79.06 ve %85.91 olduğunu bildirmiştir. Literatürde taze meyve suyunun konsantresine kıyasla daha düşük antioksidan aktivite sergilediği başka çalışmalar bulunmaktadır (Horuz 2011; Tezcan vd. 2009). Bu durum ticari nar ekşilerinin üretim süreci boyunca ısıl işleme maruz kalması ve bu esnada birçok kimyasal reaksiyon gerçekleşmesi ile açıklanmıştır. Söz konusu reaksiyonların en önemlisi Maillard reaksiyonudur. Maillard reaksiyon ürünleri karışımının yüksek anti-radikal aktivite sergilediği bilinmektedir. Son ürün karışımında bireysel olarak hangi bileşiğin antioksidan aktiviteden sorumlu olduğu bilinmemekle birlikte, melanoidinlerin radikal süpürücü aktivite (oksijen, O^{2-} ve OH* radikalleri ile girdiği reaksiyon) ve aynı zamanda metal şelatlama kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir (Morales ve Jimenez-Perez 2001; Yıldız vd. 2010; Karagöl ve Rakıcıoğlu 2023).

Çizelge 1. Nar ekşileri ve nar suyunun antioksidan kapasitesi (DPPH), toplam fenolik içerik (TFİ), antosiyanin miktarları

Örnekler	DPPH (% İnhibisyon)	TFİ (mg GAE/g KA)	Antosiyanin (mg/L)
1	88.45±0.00^{b}	19.69±0.74^{c}	21.35±0.63^{bc}
2	89.85±0.10^{a}	15.93±0.16^{d}	3.77±0.36^{d}
3	87.86±0.42^{c}	22.32±0.08^{b}	24.37±0.46^{b}
4	85.24±0.00^{d}	19.85±0.09^{c}	20.48±0.28^{c}
5	88.45±0.00^{b}	15.56±0.12^{d}	3.93±0.18^{d}
6	84.19±0.00^{d}	86.98±0.41^{a}	95.98±7.94^{a}

1-5: farklı marka ticari nar ekşisi, 6: taze nar suyu. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir (P <0.05).

Nar ekşileri ve nar suyunun toplam fenolik içeriği Folin Ciocalteu tekniği ile belirlenmiş olup, sonuçlar Çizelge 1'de görülmektedir. Literatürde (Ali vd. 2014; Elfalleh vd. 2009) yer alan değerlerle uyumlu olarak nar suyunun TFİ 86.98 mg GAE/g KA olarak saptanırken daha düşük sonuçların elde edildiği çalışmalar da (Hmid vd. 2017; Tezcan vd. 2009) bulunmaktadır. Ticari nar ekşisi örneklerin TFİ değerleri 15.56-22.32 mg GAE/g KA aralığında değişmekte olup önceki çalışmalar ile (2.74-52.6 mg GAE/g) uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir (Öztan 2006; Yılmaz vd. 2007). Çalışma sonuçlarında nar ekşisi örneklerinin toplam fenolik içeriğinin taze nar suyuna kıyasla daha düşük olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde farklı meyve reçellerinin TFİ'nin meyveye kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiş ve azalmanın nar suyunu konsantre etme amacıyla uygulanan ve uzun süren ısıl işlemden kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Vatansever 2018). Ticari nar ekşisi örneklerinin TFİ arasındaki farklılığın ise hammadde ve üretim koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Antosiyaninler, içerisinde narın da bulunduğu pek çok meyveye kırmızı-mor renk veren suda çözünür pigmentlerdir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi, taze nar suyunun ve nar ekşisi örneklerinin antosiyanin içerikleri arasında istatistiksel olarak önemli (P<0.05) farklılıklar tespit edilmiştir. Taze nar suyunda antosiyanin miktarı 95.98 mg/L olarak belirlenirken, nar ekşisi örneklerinde 3.77 mg/L-24.37 mg/L aralığında değiştiği belirlenmiştir. Taze nar suyu analiz sonucu ile uyumlu olarak, Çam vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada Türkiye'de yetiştirilen 8 farklı nar türünden elde edilen nar sularının antosiyanin miktarlarının 81-369 mg/L aralığında olduğu, yine benzer şekilde Hmid vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada 18 farklı nar meyvesinin antosiyanin miktarının 56.58-188.7 mg/L aralığında olduğu bildirilmiştir. Antosiyaninler ve ısıl işlem arasında negatif korelasyon olduğu bilinmektedir (İncedayı vd. 2010). Çalışma sonuçlarına göre de, taze nar suyuna kıyasla ticari nar ekşisi örneklerinin antosiyanin miktarlarında üretim esnasında uygulanan ısıl işlem sebebi ile istatistiksel olarak önemli (P <0.05) miktarlarda azalma olduğu gözlemlenmiştir. Fischer vd. (2012) nar suyunda bulunan antosiyaninlerin termal stabilitesini (90°C'de ve 5 saatlik periyotta) inceledikleri çalışmalarında, ısıl işlem sebebi ile gerçekleşen antosiyanin kaybının %76-87 aralığında olduğunu bildirmiştir.

3.2. HPLC analizleri

Şeker ve organik asit miktarı

Çalışma kapsamında glikoz, fruktoz, sukroz tüm örneklerde, sorbitol ise nar suyu ve iki tane ticari nar ekşisi örneğinde tespit edilmiştir (Çizelge 2). Literatürde nar suyunun temel şeker bileşenleri glikoz (39.25-69.14mg/mL) ve fruktozdur (45.49-98-6.63 mg/mL) (Tezcan vd. 2009). Glikoz ve fruktoz miktarları taze nar suyu için sırasıyla 52.45 mg/mL, 39.52 mg/mL olarak belirlenirken, nar ekşisi örneklerinde 59.90-69.80 mg/mL ve 41.12-46.26 mg/mL aralığında olduğu saptanmıştır. Nar ekşisi örneklerinin toplam şeker miktarının (134.04-143.74 mg/mL) taze nar suyuna (120.41 mg/mL) kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Nar ekşisi üretim süresi boyunca su buharlaşması sonucunda son üründe karbonhidrat miktarı artmaktadır (İncedayı vd. 2010). Poyrazoğlu vd. (2002) taze nar suyunun toplam şeker miktarını 148.78 mg/mL olarak bildirmiş, Melgarejo ve Francisco Artès (2000) tarafından ticari nar sularında söz konusu değerin 110.7-158.9 mg/g aralığında olduğu rapor edilmiştir.

Çizelge 2. Nar ekşileri ve nar suyunda belirlenen şeker ve organik asitler (mg/mL)

Örnekler	Glikoz	Fruktoz	Sukroz	Sorbitol	Toplam Şeker	Malik Asit	Sitrik Asit	Askorbik asit
1	63.74±1.63^{c}	46.26±1.06^{a}	29.44±0.81^{b}	1.15±0.21^{c}	140.59±0.02^{b}	2.32±0.0.6^{b}	4.87±0.01^{b}	0.04±0.00^{b}
2	69.80±0.82^{a}	41.12±0.41^{d}	28.27±0.21^{bc}	0.00±0.00	139.18±0.20^{b}	1.83±0.12^{d}	4.54±0.23^{d}	0.03±0.00^{c}
3	65.44±0.32^{b}	45.44±0.11^{ab}	31.21±0.07^{a}	1.65±0.33^{b}	143.74±0.69^{a}	2.47±0.01^{a}	4.82±0.05^{b}	0.04±0.00^{b}
4	59.90±0.76^{c}	44.11±0.13^{b}	31.80±0.23^{a}	0.00±0.00	135.81±0.87^{c}	2.10±0.05^{b}	4.48±0.21^{c}	0.04±0.00^{b}
5	61.90±3.48^{bc}	45.07±0.84^{b}	27.07±2.33^{c}	0.00±0.00	134.04±1.99^{c}	2.00±0.04^{c}	4.43±0.06^{c}	0.03±0.00^{c}
6	52.45±5.65^{d}	39.52±1.60^{de}	25.12±0.18^{d}	3.31±0.44^{a}	120.41±4.67^{d}	2.88±0.00^{a}	4.94±0.01^{a}	0.55±0.01^{a}

1-5: farklı marka ticari nar ekşisi örnekleri, 6: taze nar suyu. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir (P <0.05).

Taze nar suyu ve ticari olarak satılan nar ekşisi örneklerinin organik asit profilinde malik, sitrik ve askorbik asit belirlenmiştir (Çizelge 2). Önceki çalışmalar ile uyumlu olarak, tüm örneklerde sitrik asidin başlıca organik asit olduğu görülmektedir (Tezcan vd. 2009; Melgarejo ve Francisco Artès 2000; Poyrazoğlu vd. 2002). Taze nar suyunda malik, sitrik ve askorbik asit miktarı sırasıyla 2.88 mg/mL, 4.94 mg/mL ve 0.55 mg/mL olarak belirlenirken, ticari nar ekşisi örneklerinde 1.83-2.47 mg/mL, 4.43-4.87 mg/mL ve 0.03-0.04 mg/mL olarak belirlenmiştir. Tezcan vd. (2009) ticari nar suyu örneklerinde sitrik asit miktarının 3.93-13.06 mg/mL ve, malik asit miktarının 0.39-4.11 mg/mL aralığında değiştiğini bildirmiştir. Bir başka çalışmada farklı nar çeşitlerinin askorbik asit miktarı 0.09- 0.11 mg/mL, aralığında tespit edilmiştir (Vatansever 2018). Çalışmada nar ekşisi örneklerinin organik asit içeriğinin taze nar suyundan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bulantekin (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, açık kazanda kaynatma yöntemi ile elmadan pekmez üretimi esnasında elmanın yapısında bulunan organik asitlerin (malik, sitrik, askorbik asit) miktarlarında önemli derecede azalma olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçta, sıcaklık ile organik asitlerde gerçekleşen yapısal bozulmalar ve çözünürlük düşüşünün etkisi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca meyvenin sahip olduğu mineral maddelerin, özellikle 2A grubu elementlerin (Mg, Ca), organik asitleri bağlayarak tuz forma dönüştürmesi sonucunda da organik asit miktarında azalma gerçekleştiği bildirilmiştir. Nar ekşisi üretim sürecinde uygulanan ısıl işlem ve ayrıca nar meyvesinin sahip olduğu mineral madde içeriğinin (Mg 62 mg/L, Ca 52 mg/L Ekşi ve Özhamamcı 2009) organik asit miktarlarında azalma üzerinde etkisi olduğu ifade edilebilir.

Fenolik Bileşikler

Taze nar suyu ve ticari nar ekşisi örneklerinin bireysel fenolik bileşimleri Çizelge 3 ve 4'de verilmiştir. Analiz edilen tüm örneklerde hibroksibenzoik asitlerden gallik asit, hidroksisinamik asitlerden klorojenik, ferulik ve kumarik asit, flavan-3-ollerden kateşin, epikateşin ve epigallokateşin, flavonollerden kuersetin ve kaempferol ve son olarak rutin gibi flavonların da aralarında bulunduğu 13 fenolik bileşik tanımlanmıştır.

Çizelge 3. Nar ekşileri ve nar suyunda 280 nm'de belirlenen fenolik bileşikler (mg/L)

Örnekler	280nm					
	Gallik asit	Prosyanidin B1	Epigallokateşin	Kateşin	Prosiyanidin B2	Epikateşin
1	26.64±0.13^{c}	13.28±0.02^{c}	3.29±0.53^{d}	3.28±0.26^{c}	1.79±0.03^{b}	8.49±0.44^{d}
2	15.63±0.29^{f}	5.79±0.02^{e}	2.30±0.25^{e}	2.77±0.75^{d}	0.70±0.23^{d}	7.35±0.24^{e}
3	25.47±0.38^{d}	12.51±0.08^{d}	3.44±0.23^{c}	3.97±0.78^{b}	1.72±0.13^{b}	10.11±0.23^{c}
4	35.05±0.22^{b}	13.91±0.14^{b}	4.22±0.48^{b}	3.90±0.32^{b}	1.21±0.25^{c}	10.61±0.10^{b}
5	16.40±0.14^{e}	5.59±0.04^{e}	2.18±0.18^{e}	2.84±0.26^{d}	0.61±0.03^{d}	7.10±0.11^{e}
6	37.24±0.29^{a}	14.31±0.48^{a}	9.76±0.19^{a}	4.68±0.60^{a}	2.53±0.07^{a}	13.69±0.24^{a}

1-5: farklı marka ticari nar ekşisi örnekleri, 6: taze nar suyu. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir (P <0.05)

Çizelge 4. Nar ekşileri ve nar suyunda 320 ve 360'nm de belirlenen fenolik bileşikler (mg/L)

Örnekler	320					360	
	Neo-klorojenik asit	Klorojenik asit	*p*-Kumarik asit	Ferulik asit	Rutin hidrat	Kuersetin 3-β-D-glikozit	Kaempferol-3 glikozit
1	0.86±0.01^{c}	1.37±0.16^{c}	0.59±0.84^{c}	1.16±0.03^{b}	1.14±0.24^{b}	1.15±0.03^{c}	0.28±0.01^{c}
2	0.39±0.01^{e}	0.90±1.78^{d}	0.47±0.09^{c}	0.11±0.32^{c}	0.22±0.08^{d}	0.79±0.01^{e}	0.21±0.00^{e}
3	0.56±0.01^{d}	1.93±0.12^{b}	1.56±0.25^{b}	1.93±0.11^{b}	1.12±0.18^{b}	1.02±0.01^{d}	0.26±0.00^{d}
4	1.22±0.03^{b}	1.30±0.35^{c}	1.33±0.44^{b}	1.83±0.82^{b}	0.95±0.19^{c}	1.85±0.05^{b}	0.43±0.00^{b}
5	0.38±0.00^{e}	0.11±1.10^{e}	0.12±0.08^{c}	0.25±0.18^{c}	0.25±0.05^{d}	0.72±0.01^{f}	0.20±0.00^{e}
6	4.91±0.10^{a}	2.46±2.38^{a}	4.27±0.97^{a}	2.04±0.49^{a}	2.10±0.21^{a}	2.43±0.01^{a}	1.90±0.00^{a}

1-5: farklı marka ticari nar ekşisi örnekleri, 6: taze nar suyu. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir (P <0.05).

Taze nar suyunda miktar olarak öne çıkan fenolik bileşiklerin gallik asit (37.24±0.29 mg/L), prosiyanidin B1 (14.31±0.48 mg/L) ve epikateşin (13.69±0.24 mg/L) olduğu saptanmıştır. Ticari nar ekşisi örneklerinde ise uygulanan ısıl işlemin etkisi ile tüm fenolik bileşiklerde istatistiksel olarak önemli (P<0.05) seviyede miktar azalması belirlenmiştir. Nar ekşisi örneklerinde gallik asit miktarının 15.63-35.05 mg/mL, prosiyanidin B1 miktarının 5.59-13.91 mg/mL ve epikateşin miktarının 7.10-10.61 mg/mL aralığında değiştiği saptanmıştır. Çalışma kapsamında incelenen nar suyu ve nar ekşisi örneklerinde belirlenen fenolik bileşik çeşitleri önceki çalışmalarla uyumludur (Poyrazoğlu vd. 2002; Hmid vd. 2017; Gündoğdu ve Yılmaz 2012). Çalışma sonuçlarında tespit edilen fenolik bileşik miktarları ise Poyrazoğlu vd. (2002) verilerinden daha yüksek, Gündoğdu ve Yılmaz (2012) bulgularından daha düşük ve Hmid vd. (2017) rapor ettiği değerler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Literatür bulguları arasındaki farklılığın nar türü, nar agro-klimatik yetiştirme koşulları, nar ekşisi üretim tekniğindeki değişiklikler, ekstraksiyon ve analiz tekniğindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışma kapsamında belirlenen tüm fenolik bileşik miktarlarının taze nar suyunda ticari nar ekşisi örneklerine kıyasla daha yüksek miktarlarda bulunduğu belirlenmiştir. Çalışma bulguları ile uyumlu olarak, literatürde taze sıkılmış nar suyu, ticari nar suyu ve konsantre nar suyunda tespit edilen tüm fenolik bileşiklerin (kafeik asit, *p*-kumarik asit, ferulik asit, gallik asit ve klorojenik asit) en düşük miktarları konsantre nar suyunda belirlenmiş olup en yüksek miktarlar taze sıkılmış nar suyunda belirlenmiştir (Karakaplan ve Özcan 2017).

HMF

Maillard reaksiyonu ısıl işlem süresinde gıdalarda gerçekleşmekte ve gıdaların görünüş, tat ve aromasının gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. HMF maillard reaksiyon ürünlerinden biridir ve yüksek sıcaklıklarda şeker dekompozisyonu ile oluşmaktadır. HMF, karsinojenik, neoplastik dönüşüm, nefrotoksik, hepatotoksik ve antioksidan aktivite gibi insan sağlığı üzerinde çeşitli etkilerde bulunabilmektedir. Bu sebeple gıdalarda HMF miktarının bilinmesi ve yasal sınırın altında olması hayati önem taşımaktadır (Oguz vd. 2023). Beklendiği gibi en düşük HMF miktarı taze nar suyunda (0.15 mg/kg KA) belirlenmiştir. Nar ekşisi örneklerinde ise 104.86-426.02 mg/kg KA aralığında değiştiği saptanmıştır (Çizelge 5). Örneklerin HMF miktarındaki farklılık istatistiksel olarak önemli (P<0.05) bulunmuştur. Tüfekçi, (2008) ticari nar suyunun HMF içeriğinin 5.49-27.39 mg/L aralığında değiştiğini bildirmiş, Vatansever (2018) ise nar suyu HMF içeriğini 0.12 mg/L olarak belirlemiştir. Nar ekşisi örneklerinin HMF değerlerini inceleyen bir çalışmada aralık değer 9.20-118.68 mg/kg olarak belirlenirken (Vatansever 2018), İncedayı vd. (2010) piyasada satılan nar ekşisi örneklerinin HMF miktar aralığını 18.56-1542.98 mg/kg olarak bildirmiştir. Türk Standartları Enstitüsü (TS12720) tarafından nar ekşisinin üretim aşamasında ısıl işlem etkisi ile oluşan HMF miktarı üst limiti 50 mg/kg olarak belirtilmiştir (Oguz vd. 2023). Bu çalışmaya konu olan tüm nar ekşisi örneklerinin HMF miktarları söz konusu değerin üstündedir. Yüksek miktar HMF oluşumu nar ekşisi üretim esnasında aşırı ısı uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca nar suyunun kuru madde miktarının, pH değerinin, indirgen şeker içeriğinin ve konsantre edilme işleminin açık ya da kapalı kaplarda yapılmasının son ürün HMF miktarında etkisi olmaktadır (Vatansever 2018).

Çizelge 5. Nar ekşileri ve nar suyunda belirlenen HMF miktarları (mg/kg KA)

Örnekler	HMF
1	149.94±14.65^{c}
2	366.54±13.51^{b}
3	155.54±5.72^{c}
4	104.86±23.26^{d}
5	426.02±12.29^{a}
6	0.15±0.00^{e}

1-5: farklı marka ticari nar ekşisi örnekleri, 6: taze nar suyu. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir (P <0.05).

4. Sonuç

Bu çalışmada taze nar suyu ve ticari olarak satışa sunulan 5 farklı marka nar ekşisi örneği antioksidan kapasiteleri, fizikokimyasal özellikleri ve hidroksimetil furfural içerikleri bakımından incelenmiştir. Antioksidan aktivite bakımından en düşük sonuç taze nar suyunda belirlenirken toplam fenolik içerik, bireysel fenolik bileşik miktarları, antosiyanin ve askorbik asit miktarı bakımından taze nar suyunun nar ekşisi örneklerine kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Nar ekşisi üretim koşullarında suyun buharlaşmasına bağlı olarak son üründe şeker miktarının (glikoz, fruktoz ve sukroz) taze nar suyuna kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Türk Standartları Enstitüsü nar ekşisinde bulunabilecek HMF miktarını 50 mg/kg ile sınırlandırmıştır. Yapılan çalışmada 5 farklı marka nar eksişi örneğinin hepsinde HMF miktarının bu sınırın üstünde olduğu (104.86-426.02 mg/kg) belirlenmiştir. Uygun koşullarda üretildiği takdirde, nar ekşisi hem besin değeri hem de sağlık üzerine olumlu etkisi olan bileşikler bakımından oldukça zengin bir üründür. Gıdalarda HMF'nin ilk keşfedilmesinden günümüze kadar olan

süreçte, bilim çevreleri tarafından HMF'nin oluşum mekanizması ve koşulları aydınlatılmıştır. Ancak geçen uzun süreye rağmen, endüstriyel ve geleneksel gıda üretim hatlarında alt yapı yetersizliği, ekonomik nedenler ya da hatalı ısıl işlem uygulamaları gibi farklı nedenler ile son üründe oluşan HMF miktarı toplum sağlığını tehdit etme noktasındadır. Bu bağlamda ticari ürünlere yönelik piyasa denetimlerinin sıkılaştırılması gerekmektedir. Ayrıca endüstriyel boyutta üretim yöntemlerinin iyileştirilmesi ve yenilenmesi temelinde açık kazanda kaynatma tekniğinden ziyade vakum altında evaporasyon yönteminin uygulanması önerilmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: analiz, orijinal taslak yazım.
Yazar-2: analiz, yazım inceleme ve düzenleme.
Yazar-3: kavramsallaştırma, görselleştirme, denetleme, yazım inceleme ve düzenleme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Ali, S. I., El-Baz, F. K., El-Emary, G. A. E., Khan, E. A. and Mohamed, A. A., 2014. HPLC-Analysis of polyphenolic compounds and free radical scavenging activity of pomegranate fruit (*Punica granatum* L.). *International Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, **6**(4), 348-355.

Bulantekin, Ö., 2014. Farklı yöntemler ile üretilen elma pekmezlerinin kimyasal özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 58.

Binici, T., Sevinç, G. and Palabıçak, M. A., 2023. Türkiye'de nar üretimi, dış ticareti ve işletme düzeyinde ekonomik analizi. Nar Yetiştiriciliği. S. Hepaksoy, M. Pakyürek (Ed.), İksad Yayınevi, Ankara, Türkiye, 353-376. https://doi.org/10.5281/zenodo.10475381

Campbell, O. E., Merwin, I. A. and Padilla-Zakour, O. I., 2013. Characterization and the effect of maturity at harvest on the phenolic and carotenoid content of northeast USA apricot (*Prunus armeniaca*) varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* **61**, 12700–12710. https://doi.org/10.1021/jf403644r

Çam, M., Hısıl, Y. and Durmaz, G., 2009. Classification of eight pomegranate juices based on antioxidant capacity measured by four methods. *Food Chemistry,* **112**, 721–726. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.009

Ekşi, A. and Özhamamcı, İ., 2009. Nar suyunun kimyasal bileşimi. *Gıda*, **24**, 265-270.

Elfalleh, W., Nasri N., Marzougui, N., Thabti, I., M'rabet, A., Yahya Y., Lachiheb, B., Guasmi, F. and Ferchichi, A., 2009. Physico-chemical properties and DPPH-ABTS scavenging activity of some local pomegranate (*Punica granatum*) ecotypes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **60**(S2), 197-210. https://doi.org/10.1080/09637480903067037

El Hosry, L., Bou-Mitri, C., Dargham, M. B., Jaoudeh, M. A., Farhat, A., El Hayek, J., Bou Masleh, J. M. and Bou-Maroun E., 2023. Phytochemical composition, biological activities and antioxidant potential of pomegranate fruit, juice and molasses: A review. *Food Bioscience,* **55**, 103034. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103034

Fischer, U. A., Carle, R. and Kammerer, R., 2012. Thermal stability of anthocyanins and colourless phenolics in pomegranate (Punica granatum L.) juices and model solutions. *Food Chemistry*, **138**, 1800-1809. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.072

Gil, M. I., Tomas-Berberan, A., Hess-Pierce, B., Holcroft, D. M. and Kader, A. A., 2000. Antioxidant activity of pomegranate juice and its relationship with phenolic composition and processing. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, **48**, 4581–4589. https://doi.org/10.1021/jf000404a

Güncüoğlu, N. and Gökmen, V., 2013. Accumulation of 5-Hydroxymethylfurfural in oil during frying of model dough. *Journal of American Oil Chemical Society,* **90**, 413-417. https://doi.org/10.1007/s11746-012-2169-9

Gündoğdu, M. and Yılmaz, H., 2012. Organic acid, phenolic profile and antioxidant capacities of pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars and selected genotypes. *Scientia Horticulturae,* **143**, 38–42. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.029

Horuz E., 2011. Pomegranate aril drying and juice powder production. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 121.

Hmid I., Elothmani, D., Hanie, H., Oukabil, A. and Mehinagic E., 2017. Comparative study of phenolic compounds and their antioxidant attributes of eighteen pomegranate (Punica granatum L.) cultivars grown in Morocco. *Arabian Journal of Chemistry*, **10**, 2675–2684. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.10.011

İncedayı, B., Tamer, C. E. and Çopur, Ö. U., 2010. A research on the composition of pomegranate

molasses. *Uludağ Üniversitesei Ziraat Fakültesi Dergisi,* **24** (2), 37-47.

Karabulut, I., Bilenler, T., Sislioglu, K., Gokbulut, I., Ozdemir, I. S. and Ozturk, B., 2018. Effect of fruit canopy positions on the properties of apricot (*Prunus armeniaca* L.) varieties. *Journal of Food Biochemistry,* **42**, 12458. https://doi.org/10.1111/jfbc.12458

Karagöl, G. and Rakıcıoğlu, N., 2023. Besinlerde melanoidin oluşumu ve sağlık üzerine etkileri. *Food and Health*, **9**(4), 350-358. https://doi.org/10.3153/FH23032

Karakaplan, M. and Özcan, M., 2017. Determination of phenolic acids in pomegranate juices by HPLC- DAD. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Degisi,* **6**(10), 32-37.

Kim, D. O. and Lee, C. Y., 2002. Extraction and isolation of polyphenolics. Current protocols in food analytical chemistry. In R. E. Wrolstad (Ed.), New York: Wiley, (pp. I1.2.1–I1.2.12). https://doi.org/10.1002/0471142913.fai0102s06

Lee, J., Durst, R.W. and Wrolstad, R. E., 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: Collaborative study. *Journal of AOAC International,* **88**(5), 1269–1278. https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269

Melgarejo, P. and Francisco Artès, D. M. S., 2000. Organic acids and sugars composition of harvested pomegranate fruits. *European Food Research Technology,* **211**, 185-190. https://doi.org/10.1007/s002170050021

Morales, F. J. and Jimenez–Perez, S., 2001. Free radical scavenging capacity of maillard reaction products as related to colour and fluorescence. *Food Chemistry,* **72**, 119–125. https://doi.org/:10.1016/S0308-8146(00)00239-9

Oguz, M., Akar, B. and Baltacı, C., 2023. Physicochemical analysis of pomegranate sours produced by traditional method in Türkiye and the ınvestigation of antioxidant properties. *Hittite Journal of Science and Engineering,* **10**(2), 125–134. https://doi.org/10.17350/HJSE19030000299

Orak, H., 2008. Evaluation of antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice and its sour concentrate processed by conventional evaporation. *International Journal of Food Sciences and Nutrition,* **60**(1), 1-11. https://doi.org/10.1080/09637480701523306

Öztan, T., 2006. Mor havuç, konsantresi, şalgam suyu, nar suyu ve nar ekşisi ürünlerinde antioksidan aktivite tayini ve fenolik madde profilinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 93.

Poyrazoğlu, E., Gökmen, V. and Artık, N., 2002. Organic acids and phenolic compounds in pomegranates (*Punica granatum* L.) grown in Turkey. *Journal of Food Composıtıon and Analysıs,* **15**, 567–575. https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1071

Sturm, K., Koron, D. and Stampar, F., 2003. The composition of fruit ofdifferent strawberry varieties depending on maturity stage. *Food Chemistry,* **83**, 417–422. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00124-9

Tezcan, F., Gültekin-Özgüven, M., Diken, T., Özçelik, B. and Erim, F.B., 2009. Antioxidant activity and total phenolic, organic acid and sugar content in commercial pomegranate juices. *Food Chemistry,* **115**, 873-877. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.103

Tüfekçi, B., 2008. Piyasada satılan bazı meyve sularının özelliklerinin gıda mevzuatına uygunluğunun araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 59.

Vatansever, A., 2018. Nar ve ürünlerinin fizikokimyasal ve biyokimyasal özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 81.

Yıldız, O., Şahin, H., Kara, M., Aliyazıcıoğlu, R., Tarhan, Ö. and Kolaylı, S., 2010. Maillard reaksiyonları ve reaksiyon ürünlerinin gıdalardaki önemi. *Akademik Gıda,* **8**(6), 44-51.

Yılmaz, Y., Çelik, I. and Isık, F., 2007. Mineral composition and total phenolic content of pomegranate molasses. *Journal of Food, Agriculture* & *Environment,* **5**(3&4), 102-104.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1555881
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045402 (846-853)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045402 (846-853)

Some Chemical and Microbiological Properties of Homemade Capia Pepper Paste and Puree Samples

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 25.09.2024
Kabul/Accepted: 04.03.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Ev Yapımı Kapya Biber Salça ve Pürelerinin Bazı Kimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikleri

Musa YALMAN[1*] Seda ÖZDİKMENLİ TEPELİ[2]

[1] *Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma Vocational School, Deparment of Food Processing, Bandırma-Balıkesir, Türkiye*
[2] *Çanakkale Onsekiz Mart University, Yenice Vocational School, Departmet of Veterinary, Yenice-Çanakkale, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract
Capia pepper (*Capsicum annuum L*. cv. Capia) is economically most well-known and critical essential species, widespread worldwide. People typically consume fresh, pickled pastes and purees in sauces, soups, canned foods, or powdered or flaked pepper. The food industry also uses it as an additive. In the Turkish Food Codex Communiqué on Paste and Similar Products, pepper paste and puree are defined according to the amount of water-soluble dry matter (brix). Their brix values ranged from 8.75% to 31.24%. The total acidity of paste and puree samples did not exceed 10% by mass (m/m), and the salt content of our samples varied between 0.93% and 3.34%. Therefore, these values were found to comply with the Turkish Food Codex Communiqué on Paste and Similar Products. Capia pepper paste and puree samples had pH values ranging from 3.60 to 4.96. The ash content of the 53.33% samples did not exceed the maximum 0.3% (m/m). Raw ingredients, process methods, microorganisms involved in the fermentation, and duration of the fermentation significantly influence the organoleptic properties of capia pepper paste and puree, including its aroma, taste, and texture. The mold and yeast count of the capia pepper paste and puree samples varied by approximately 1 log CFU/g and 6.99 log CFU/g. The aim of this study is to investigate the chemical and microbiological properties of capia pepper pastes and purees produced using traditional open pan techniques and to evaluate them according to the Turkish Food Codex Communiqué on Tomato Paste and Similar Products.

Keywords *Red pepper; Paste; Capia; Open-Pan Techniques*

Öz
Dünya çapında yaygın bir tür olan Kapya biberinin (*Capsicum annuum L. cv.* Capia) ekonomik değeri Türkiyede her yıl artmaktadır. Kapya biberi soslarda, çorbalarda, konserve gıdalarda, salça ve pürelerde toz veya pul biber formunda, salamura veya taze olarak kullanılmaktadır. Gıda endüstrisinde katkı maddesi olarak da kullanmaktadır. Türk Gıda Kodeksi Salça ve Benzeri Ürünler Tebliği'nde biber salçası ve püresi suda çözünebilir kuru madde (briks) miktarına göre tanımlanmıştır. Çalışmadaki örneklerin briks değerleri %8.75 ile %31.24 arasında değişmektedir. Salça ve püre örneklerinin toplam asitliği kütlece %10'u (m/m) geçmediği belirlenmiş olup, tuz içerikleri ise %0.93 ile %3.34 arasında değiştiği tepit edilmiştir. Dolayısıyla bu değerlerin Türk Gıda Kodeksi Salça ve Benzeri Ürünler Tebliği'ne uygun olduğu görülmüştür. Kapya biber salçası ve püresi örneklerinin pH değerleri 3.60 ile 4.96 arasında değişmektedir. Örneklerin %53.33'nün kül içeriği maksimum %0.3'ü (m/m) aşmamıştır. Ham maddeler, işleme yöntemleri, fermentasyona katılan mikroorganizmalar ve fermentasyon süresi kapya biber salçası ve püresinin aroma, tat ve doku gibi organoleptik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kapya biber salçaları ve pürelerinin küf ve maya sayısı yaklaşık 1 log CFU/g ve 6.99 log CFU/g arasında değişmiştir. Bu çalışmanın amacı, geleneksel açık tava teknikleri kullanılarak üretilen kapya biber salça ve pürelerinin kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri araştırmak ve Türk Gıda Kodeksi Salça ve Benzeri Ürünler Tebliği'ne göre değerlendirmektir.

Anahtar Kelimeler *Kırmızı Biber, Salça; Kapya; Açık Tava Tekniği*

1. Introduction

Capia pepper (*Capsicum annuum L*. cv. Capia) is a nutritional variety in the red sweet pepper group. Sweet pepper (*Capsicum annum L*.) belongs to the *Solanaceae* family, a widely cultivated and essential group of vegetables. Sweet pepper is the second most commonly cultivated important vegetable after tomatoes. Sweet peppers are harvested at the green ripeness stage or different coloring stages (yellow and red) (Kaur and Kaur 2021). It also contains aroma compounds such as alcohol, aldehyde, and ester. The Food and Agriculture Organization (FAO) reported that global fresh vegetable production has reached 1.1 billion tons. Turkey ranks fourth in the world with 38.1 million tons of vegetable production. Pepper production is increasing worldwide. Turkey, with 3.091.295 tons, is the second-largest producer after China. The Turkish Statistical Institute reports that capia pepper constitutes 46.8% of the total pepper production, amounting to 1.445.275 tons (Polat et al. 2024). Sweet peppers are essential to the food industry

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Musa Yalman e-posta/e-mail: myalman@bandirma.edu.tr

due to their widespread use as flavoring and coloring agents in sauces, soups, beverages, snacks, desserts, processed meats, and separated drinks (Kaur and Kaur 2021).

People typically consume fresh pickles, pastes, purees, sauces, soups, canned foods, powder, or flaked pepper, and the food industry uses it as a food additive (Askin Uzel 2018, Demirkaya and Gunes 2020, Kasım and Kasım 2018, Yilmaz 2020). Moreover, the ripe fruits of red pepper serve as a spice, a source of red pigment, and a vegetable in numerous countries (Demirkaya and Gunes 2020, Gogus et al. 2015). Capia peppers are very low in sodium, cholesterol, and saturated fat. They are also high in compounds like vitamins A and C, antioxidants, phenolics and flavonoids, carotenoids, tocopherols (vitamin E), folate, and capsaicinoids (González-Zamora et al. 2013, Kasım and Kasım 2018, Polat et al. 2024). Therefore, it is essential in human nutrition, particularly in developing countries (Bozkurt and Erkmen 2004, Demirkaya and Gunes 2020).

In 2023, capia pepper production in Turkey reached 1.6 million tons. The Mediterranean region is the most productive, producing 510 thousand tons of capia pepper. Çanakkale is the leader in Turkey, with a production of 344 thousand tons, meeting 21% of the total output in the country. Regions such as the Mediterranean, Western Marmara, Aegean, Southeastern Anatolia, and Western Black Sea are also essential production centers (Int. Ref-1, Int. Ref-2).

In general, the products in the Aegean and Mediterranean regions are table peppers, and those in the Marmara region are peppers produced for processing products such as pastes, purees, and pickles (Sermenli and Mavi 2010). Furthermore, Turkey's capia pepper exports have surged to 50 thousand tons in 2023, resulting in a revenue of 73 million dollars. Turkey plays a vital role in exporting capia pepper to many countries. European Union countries stand out among its main export markets. Germany, the Netherlands, Italy, France, and Belgium are the main export destinations for Turkey's capia pepper. Middle Eastern countries also receive its exports. These countries demand capia pepper for paste, spices, and pickles (Int. Ref-1, Int. Ref-2).

Pepper paste has been traditionally manufactured at home for many years in Turkey. In a survey conducted by Tapki and Sacmalıoğlu (2023), 81.9% of respondents reported that they produce pepper paste at home. Pepper paste is traditionally produced at home with different methods such as sun drying, open pan boiling, semi-drying and fermentation, although it varies by region of Turkey (Ayda et al. 2023). In this study, the traditional method of producing capia pepper paste and puree samples involves the following steps: The first step consists of collecting mature capia peppers from the field, washing them with water, and preparing them for production by separating the seeds and stems. The peppers are chopped finely, put in a large pot, enough water is added, and boiled over a wood fire. Once boiling achieves sufficient concentration, salt and oil is added 5 minutes before packing. The final step involves filling jars with concentrated capia pepper paste and puree, resting them, and covering them with a cloth. After they have rested, the packages are taken and stored in a suitable area. Production stages are given in Figure 1.

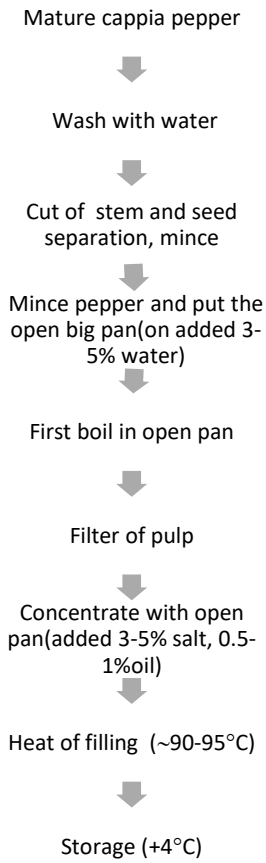


Figure 1. Production of traditional homemade capia pepper paste and puree with an open pan

The literature has limited information regarding the quality and stability of capia pepper paste, and puree produced using traditional methods. Specific aspects often not documented include dry matter content, salt levels, percentage of ash dissolved in 10% HCl, acidity, dry matter soluble in water, pH, invert sugar content, and counts of aerobic bacteria, molds, and yeasts. The "Turkish Food Codex Communiqué on Paste and Similar Products (Communiqué No: 2020/19)" specifies the physical-chemical and microbiological standards that must be followed in our country when producing pepper

paste and puree on an industrial scale. This study assesses the chemical and microbial quality characteristics of capia pepper paste and puree samples made through traditional techniques.

2. Materials and Methods

This research collected homemade traditional capia pepper paste and puree samples from public markets in Çanakkale. Samples were stored in a refrigerator at +4 °C until analyses. The chemical and microbiological properties of these samples were determined.

2.1 Chemical analyses

About 50 grams were weighed. Each sample was then homogenized using a blender. The homogenized samples were used to measure pH, titratable acidity, dry matter, salt, and ash-soluble solution in 10% HCl and invert sugar and total soluble solids in water formation. Following filtration, titratable acidity (TA) was measured using 25 mL aliquots titrated at pH 8.1 (Hanna pH2211 ORP meter, Michigan, USA) with 0.1 N NaOH and three drops of 1% phenolphthalein. The results were expressed as grams of citric acid per 100 g of capia pepper paste and puree weight (Bozkurt and Erkmen 2005, Ilić et al. 2015). Total soluble solids (TSS) for each capia pepper paste and puree sample were calculated in two replicates using a refractometer at 20 °C. The results were expressed as a percentage of total soluble solids (Ilić et al. 2015). By measuring the pH of 10 g of the homogenized sample in distilled water, the ratio of the sample to water (w/v) was calculated.

Dry matter content was determined. A three-gram sample was dried at 105°C until it reached constant weight (Bozkurt and Erkmen 2005). Following the instructions, the amount of dry matter was determined by drying the homogenized sample at 105°C for approximately 3 h and then at 105°C for approximately h. The dried sample residue was then burned in a ceramic vessel at 525°C for 16 h. The soluble ash content in 10% HCl solution (Anonymous. 2000) was determined by weighing the residue. The copper-reduction method can identify the presence of added sucrose by specifying the amount of sugar before and after inversion. To invert at room temperature, a 50-mL clarified aliquot was transferred into a 100-mL volumetric flask, then added 10 mL of HCl (1:1), and left it at room temperature for 24 hours. The sample was heated with HCl at 70 °C for 1 hour to facilitate inversion. That saved time and shortened the whole process. Using phenolphthalein, neutralized the NaOH solution precisely to the concentration and diluted it to 100 mL. Titration against the mixed Felling A and B solution (25 mL of Felling's solution can be considered) revealed the total sugar as inverted sugar. The added sugar was calculated by subtracting the reduced sugar from the total (AOAC. 2000).

2.2 Microbiological analyses

For the enumeration of the microbial contamination levels of the selected capia pepper paste and puree samples, a representative sample of 10 g from each sample was aseptically taken, and the primary decimal dilution was prepared by adding an appropriate volume of peptone saline solution (PPS: 0.85% NaCl and 0.1% peptone in distilled water). Samples were homogenized for 60 min, at 22ºC with a stomacher (Bag Mixer 400SW Lab Blenders, USA). Subsequently, decimal dilution series were prepared with the primary dilution using PPS and made with the pour-plated technique in Plate Count Agar (PCA, Merck, Germany). PCA plates were formed as duplicates with incubation at 37°C for 3 days (Pothakos, 2012). Total yeast and mold counts were duplicated using the pour plate technique using potato dextrose agar (PDA, Merck, Germany). PDA petri dishes were incubated for up to 5 days at 25°C before counting (Brodsky 1982).

2.3. Statistical Analyses

The data was analyzed using the Sheskin (2003) method. The data were expressed as mean ± standard error (SE). The data were subjected to a non-parametric analysis of Kruskal Wallis and multiple comparison tests according to the statistical significance level on SPSS 25.0 statistical software.

3. Results and Discussions

3.1. Some chemical analyses of samples

3.1.1. pH values and titratable acidity

Since the traditional homemade capia pepper paste and puree samples were purchased from different public markets and people, the samples' pH values were between 3.60 and 4.96. The pH and titratable acidity values of traditional capia pepper paste and puree samples are given in Table 1. The capia pepper paste and puree samples showed no statistically significant differences in pH ($p > 0.05$). 20% of the samples in the study have a pH value between 4.1 and 5.0, as stated in the Turkish Food Codex Paste and Similar Products Communiqué. All capia pepper paste and puree samples regarding titratable acidity were statistically found to be insignificant ($p>0.05$). The percentage of citric acid determined the titratable acidity of capia pepper paste and puree. The titratable acidity of capia pepper paste and puree samples changed between 0.16% and 1.44%. The total acidity of the paste and puree samples did not exceed 10% (m/m) by mass. Thus, they were found to

comply with the Turkish Food Codex Paste and Similar Products Communiqué.

Table 1. Values of pH and titratable acidity of capia pepper paste and puree samples (Average ± Std.Error).

Sample Nu.	pH	Acidity %
1	4.05 ± 0.02	0.83 ± 0.12
2	4.30 ± 0.02	0.32 ± 0.00
3	4.72 ± 0.02	0.26 ± 0.02
4	4.65 ± 0.00	0.29 ± 0.05
5	4.45 ± 0.02	1.16 ± 0.03
6	4.65 ± 0.00	0.70 ± 0.12
7	4.38 ± 0.02	1.07 ± 0.03
8	4.72 ± 0.02	0.30 ± 0.03
9	3.90 ± 0.00	0.62 ± 0.03
10	4.66 ± 003	0.19 ± 0.00
11	3.98 ± 0.00	1.44 ± 0.06
12	4.96 ± 0.00	0.16 ± 0.00
13	4.81 ± 0.01	0.25 ± 0.00
14	3.60 ± 0.01	0.91 ± 0.03
15	3.72 ± 0.01	0.49 ± 0.03

In work conducted by Guzel (2017), it was reported that the pH values of commercial pepper pastes were changed to be between 3.61 and 4.82%. Askin Uzel (2017) reported that the pH value of sweet red pepper changed between 4.35 and 4.44. Both the researcher's pH values were similar to those in our study. However, Erdogan (2013) conducted a study where the pH values ranged from 5.69 to 5.14. The pH values the researcher provided are higher than those in our study. This can occur because the researcher produced red pepper pastes and purees in a controlled environment. However, our homemade samples were made by housewives from the public market in an uncontrolled environment. Therefore, this study asserts that the pH values are lower than those of previous literature-based studies. Guloksuz Sahin (2021) determined that the pH value of tomato and capia pepper pastes were between 4.03 and 4.80. Askin Uzel (2017) reported that the temperature difference in the filling process did not alter the pH value in capia pepper paste and puree samples production. Still, the increase in the total sugar content of the final product caused higher titratable acidity, that is, a lower pH value. On the other hand, Bozkurt and Erkmen (2005) stated that the pH value of fresh hot pepper was around 5.20, and after the production of hot pepper pastes, pH values changed between 4.08 and 6.05. The production techniques significantly affect the pH values of pepper pastes. The pH values of the pepper pastes and purees produced using the traditional method may be lower than those using the vacuum technique. During the production of pepper pastes and purees using the traditional technique, lower pH values, fermentation, and acid production may occur at the beginning of the process (Bozkurt and Erkmen 2005).

In Erdogan's (Erdogan 2013) study, titratable acidities were found between 0.09% and 0.29%. For instance, Bozkurt and Erkmen (2005) found the acidity values of hot pepper pastes, produced with an open pan and without salt, were changed between 1.12% (in the storage process of 0. day) and 0.38% (in the storage process of 46. days). In research conducted by Askin Uzel (2017), it was reported that the total acidity of capia pepper pastes changed from 0.65% to 0.69%. Guloksuz Sahin (2021) determined that the titratable acidity value of tomato and capia pepper pastes were between 0.17% and 1.64%. It has been determined that there is a similarity between some acidity values obtained in our study and those found by these researchers. For instance, a work by Guzel (2017) reported that the total acidity values of commercial pepper pastes were changed to between 2.61% and 6.77%. Researchers determined that the processing technique significantly affected the acidity of pepper pastes and purees. They also specified that pepper pastes and purees produced with the traditional technique had higher acidity than those produced by the vacuum technique. Researchers have stated that fermentation occurs in the early days of the traditional production process, but this fermentation may not occur in the vacuum technique. They have noted that this may be due to the high temperature (at 70°C) applied in the vacuum technique, which inhibits some acid-producing microorganisms (Bozkurt and Erkmen 2005).

3.1.2. Basic chemical component

The chemical composition of the capia pepper paste and puree samples are given in Table 2. Among the capita pepper paste and puree samples, significant differences were observed statistically with regards to dry matter (%), salt (%), inverted sugar (%), soluble ash in 10% HCl solution (%), and soluble solids (Brix %) (p <0.05).

The highest dry matter value of capia pepper paste and puree samples was 36.08%, while the lowest dry matter was 11.34%. The samples' moisture content varied between 88.65% and 63.92%, and the ash content varied between 0.14% and 0.49%. The ash content of the 40% sample did not exceed the maximum 0.3% (m/m) value in the Turkish Food Codex Paste and Similar Products Communiqué. Moreover, the brix value of pepper puree must be at least 9% and at most 15%, and the brix of pepper paste, excluding added salt, must be at least 18% (Int. Ref- 3). Considering these definitions, some of the samples collected from public markets labeled paste are suitable for the definition of puree. The salt content

should not exceed 5%. The salt content of our samples varied between 0.92% and 3.34%, and it was found to comply with the communiqué's criteria. The highest inverted sugar value of capia pepper paste and puree samples was 17.59%, while the lowest inverted sugar value was 1.51% in this study.

Table 2. Essential compounds of capia pepper paste and puree samples (% Average ± Std.Error)

S.Nu	Dry Matter	Salt	Inver Sugar	Ash	Brix
1	24.16 ± 0.10	1.81 ± 0.00	5.72 ± 0.25	0.34 ± 0.01	12.49 ± 1.24
2	17.54 ± 0.25	2.00 ± 0.01	4.76 ± 0.10	0.34 ± 0.00	10.13 ± 1.37
3	14.70 ± 0.31	1.41 ± 0.10	5.75 ± 0.00	0.25 ± 0.00	11.25 ± 0.00
4	18.36 ± 0.21	1.58 ± 0.01	8.48 ± 1.11	0.16 ± 0.00	15.00 ± 0.00
5	36.08 ± 0.01	2.29 ± 0.04	17.59 ± 0.00	0.49 ± 0.02	31.24 ± 0.00
6	22.16 ± 0.30	2.86 ± 0.11	5.52 ± 0.33	0.38 ± 0.06	17.50 ± 0.00
7	31.19 ±0.31	2.05 ± 0.03	16.25 ± 0.41	0.22 ± 0.02	27.50 ± 0.00
8	25.30 ± 0.13	2.62 ± 0.02	6.16 ± 0.29	0.36 ± 0.16	17.50 ± 0.00
9	16.45 ± 0.03	2.69 ± 0.02	12.29 ± 0.12	0.48 ± 0.00	13.75 ± 0.00
10	12.47 ± 0.08	0.92 ± 0.19	4.49 ± 1.16	0.25 ± 0.00	13.75 ± 0.00
11	25.50 ± 0.29	1.16 ± 0.04	11.52 ± 0.20	0.45 ± 0.00	21.24 ± 0.00
12	15.65 ± 0.15	2.11 ± 0.01	5.51 ± 0.04	0.36 ± 0.01	8.75 ± 0.00
13	15.41 ± 0.12	1.39 ± 0.01	6.66 ± 0.07	0.32 ± 0.00	8.75 ± 0.00
14	11.34 ± 0.38	1.00 ± 0.01	1.51 ± 0.00	0.14 ± 0.01	10.25 ± 0.00
15	15.81 ± 0.01	3.34 ± 0.00	1.70 ± 0.00	0.37 ± 0.00	30.00 ± 0.00

Erdogan (2013) reported that the values of dry matter and soluble solids of capia pepper paste and puree samples were between 9.69-34.58% and 7.63-34.00%, respectively. Guloksuz Sahin (2021) determined that the soluble dry matter contents of tomato and capia pepper pastes were between 10.50% and 29.00%. The Brix of capia pepper paste and puree samples ranged between 8.75% and 31.24%. Some of these values are similar to Sharoba's findings (2009), which stated that the difference was between 27.49% and 28.12%. Of the samples in the study, 26.67% met the definition of paste, and 46.67% met the definition of puree according to the amount of Brix in the Turkish Food Codex Paste and Similar Products Communiqué. Dimassi et al. (2019) reported that the total solids of capia pepper pastes were determined to be 15.87% (drying at 50°C) and 21.49% (drying at 70°C). Guloksuz Sahin (2021) determined that the total solids content of tomato and capia pepper pastes was between 12.10% and 29.72%. These results obtained by the researchers are similar to those obtained in our study. However, generally, our total solids and the values of other researchers were found to be lower than the values of studies conducted on commercial pepper paste. For instance, work performed by Guzel (2017) reported that commercial pepper paste' solids values were changed to between 20.05% and 37.45%.

Atwaa et al. (2020) reported that the moisture and ash values of capia pepper pastes were 90.04% (g/100g) and 0.86% (g/100g), respectively. Guloksuz Sahin (2021) determined that the ash of tomato and capia pepper pastes were between 1.13% and 7.53%, 0.00% and 0.64%, respectively. In work conducted by Güzel (2017), it was reported that the ash values of commercial pepper pastes were changed to be between 0.01% and 0.42%. For instance, a work performed by Guzel (2017) reported that the salt values of commercial pepper pastes were changed to be between 2.81% and 10.18%. The Turkish Food Codex Paste and Similar Products Communiqué states that inverted sugar in pepper paste and puree should be between 35% and 70%. However, the amount of inverted sugar in our samples varies greatly. Askin Uzel (2017) reported that inverted sugar values of red pepper pastes were found to change between 15.93% and 16.07% and in work conducted by Guzel (2017) reported that the invert sugar values of commercial pepper pastes were changed to be between 34.19% and 91.60%. During fermentation, yeasts and bacteria use glucose and fructose (components of inverted sugar) as energy sources. As inverted sugar breaks down, the amount of inverted sugar decreases at the end of the process. It is converted into by-products such as carbon dioxide and organic acids (e.g., lactic acid). Depending on the intensity of fermentation, sugar may be consumed entirely. The final product, paste and puree, should contain less sugar.

3.2. Microbiological properties

The microbiological properties of capia pepper paste and puree samples are given in Table 3. In the Regulation on Amendments to the Turkish Food Codex Microbiological Criteria Regulation (Int. Ref- 4), the amount of mold for purees under the title of fruits and vegetables and their processed products is 10^2-10^3 CFU/g. The mold amount exceeded this value in 40% of the capia pepper paste and puree samples. The total mesophilic bacteria count was 10^3 - 10^4 (3-4 log CFU/g) in the repealed Pepper Paste and Puree standard (TSE 7896). Interestingly, this value is not included in the current Turkish Food Codex Microbiological Criteria Regulation. The total mesophilic bacteria count provides a general overview of microbial contamination and is used across various food production processes to ensure safety and quality. Producers can ensure fermented products' safety, quality, and consistency by monitoring the total mesophilic bacteria count. The total mesophilic bacteria count of capia pepper paste and puree samples changed between <1 log

CFU/g and 6.26 log CFU/g. On the other hand, the total mold and yeast count of capia pepper paste and puree samples changed to <1 log CFU/g and 6.99 log CFU/g.

Table 3. Microbiological properties of pepper paste and puree samples

Sample Nu.	Total mesophilic bacteria log CFU/g	Total mold and yeast log CFU/g
1	3.77	3.65
2	1.85	<1
3	<1	<1
4	<1	<1
5	3.79	<1
6	3.62	3.89
7	5.34	<1
8	6.26	6.99
9	4.23	<1
10	<1	<1
11	<1	<1
12	5.23	6.71
13	5.23	5.32
14	5.81	6.21
15	2.65	<1

The results obtained in our study are supported by the findings of other researchers (Askin Uzey 2017, Kuleasan and Okur 2012). Kuleasan and Okur (2012) examined the microbial quality during the different stages of pepper paste production. After the washing process, the total mesophilic aerobic bacteria count in the peppers used as raw materials was found to be 6.22 log CFU/g. The final stage of pasteurization led to a decrease in this count to 2.78 log CFU/g. The application of boiling and similar heat treatments in the production process significantly reduced the growth and number of these bacteria (Ayda et al. 2023). In a study by Bozkurt and Erkmen (2004), the total bacterial count in traditionally produced unsalted pepper paste was measured at 8.60 log CFU/g. For instance, In a study, the mold-yeast count was found to be 6.60 log CFU/g in raw peppers and 2.77 log CFU/g in pepper paste after pasteurization (Kuleasan and Okur 2012). Guloksuz Sahin (2021) determined that the total mesophilic bacteria and mold-yeast value of tomato and capia pepper pastes were between <1 log CFU/mL and 5.30 log CFU/mL, <1 log CFU/mL and 4.47 log CFU/mL, respectively. The raw material used to make the pepper paste is susceptible to mold contamination, which raises the risk of aflatoxin production (Guloksuz Sahin, 2021). Mold growth and mycotoxin contamination can pose significant health risks. If high levels of mold are present in either the raw materials or the final product, the risk of aflatoxin increases.

Ayda et al. (2023) evaluated the microbiological characteristics of pepper pastes manufactured using various methods. Their research indicated that the semi-drying technique, prevalent in eastern Turkey, led to a significant microbial load due to the lack of boiling. On the other hand, pepper pastes produced through heat treatment and aseptic filling demonstrated a minimal microbial load. These study samples were heat-treated but not all of them were filled under aseptic conditions. For this reason, some samples had high microbial loads. Moreover, preparing homemade capia pepper paste relies on traditional fermentation techniques using simple equipment. Several elements influence microbial quality, including local microorganisms such as capia pepper microflora and surrounding environmental factors such as weather conditions. Furthermore, raw ingredients, process methods, microorganisms involved in the fermentation, and fermentation duration significantly influence capia pepper paste's organoleptic properties, including its aroma, taste, and texture (Ramalingam et al. 2022).

Considering the results of all the studies, applying heat treatment and hot filling in glass jars to produce homemade pepper paste is more reliable regarding microbial quality. However, traditional production methods often do not eliminate mycotoxins through heat treatment and time. Therefore, it is essential to select raw materials that are free from mold contamination for pepper paste production and to prevent potential contamination at subsequent stages.

4. Conclusion

Capia pepper is an essential product in domestic and international markets. It plays an important role in Turkey's agriculture, economy, and food industry. This study investigated the chemical and microbial qualities of capia pepper paste and puree samples produced by traditional production techniques. While there were statistically significant differences in the capia pepper paste and puree samples in terms of dry matter, salt, ash, inverted sugar, and soluble solids (Brix) contents, there were no differences in pH values and titratable acidity values. Upon evaluating the chemical properties of the study results, it was found that they failed to meet the criteria outlined in the Turkish Food Codex Communique on Pastes and Similar Products (Communiqué No. 2020/19). As a result, the public authority should take more responsibility for protecting consumer rights and producing healthy and reliable products by developing new standards to control traditional food production.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards. Preliminary versions of this research were presented as an abstract at

the 2nd International Symposium on Traditional Foods from the Adriatic to the Caucasus, held on 24-26 October 2013 in Macedonia.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology, sampling and analyzing, validation, visualization, writing – original draft, and writing – review and editing.

Author-2: Conceptualization, investigation, methodology, sampling and analyzing, validation, visualization, writing – original draft, and writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statement

The authors declare that the primary data supporting the findings of this work are available within the article.

5. References

Anonymous. 2000. Determination of ash insoluble in hydrochloric acid in fruit and vegetable products (TS 1128 ISO 763), Turkish Standards Institute, Ankara

AOAC. 2000. 925.35: Sucrose in Fruit and Fruit Products, 923.09 Lane and Eynon general volumetric method, Official Methods of Analysis AOAC International, Washington DC, the USA.

Askin Uzel, R. 2017. Alternative methods to preserve sweet red pepper pastes quality: effect on temperature and protective agents. *Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Science and Engineering*, **18(3**), 695-704. https://doi.org/10.18038/aubtda.310767

Askin Uzel, R. 2018. Preservation of sweet red pepper pastes and purees quality: effect of packing material, ozone gas, and protective agent use. *Food Science and Technology (Campinas*), **38(4)**, 698-703. https://doi.org/10.1590/1678-457X.13917

Atwaa, E.H., Ramadan M.F. and Abd El-Sattar E. 2020. Production of functional spreadable processed cheese supplemented with sweet red pepper pastes. *Journal of Food and Dairy Sciences*, **11**, 127 – 132. https://doi.org/10.21608/JFDS.2020.102741

Ayda, M., Dede, S. and Didin, M., 2023. Determination and comparison of quality changes during storage of Turkish pepper paste produced by different methods. *Gıda*, ***48*(5)**, 1071-1083. https://doi.org/10.15237/gida.GD22127

Bozkurt H. and Erkmen O., 2005. Effects of salt, starter culture and production techniques on the quality of hot pepper pastes. *Journal of Food Engineering*, **69**, 473-479. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.041

Bozkurt, H. and Erkmen, O., 2004. Effects of production techniques on the quality of hot pepper pastes. *Journal of Food Engineering*, **64**, 173–178. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.028

Brodsky, M.H., Entis, P., Entis, M.P., Sharpe A.N. and Jarvis G.A. 1982. Determination of aerobic plate and yeast and mold counts in foods using an automated hydrophobic grid-membrane filter technique. *Journal of Food Protection*, **45(4)**, 301-304. https://doi.org/10.4315/0362-028X-45.4.301

Demirkaya, M. and A. Gunes, A. 2020. Effects of different phosphorus and potassium doses on yield and amino acid composition of capia pepper. *Fresenius Environmental Bulletin*, **29(02),** 1121-1128.

Dimassi, O., Fakih, Y., Sharif-Askari, E., Rached M. and Akiki R. 2019. Drying Dynamics, physicochemical properties and sensory analyses of sweet red pepper pastes and purees. *International Journal of Horticulture*, *Agriculture and Food Science* (IJHAF), **3(4)**,216-223. https://dx.doi.org/10.22161/ijhaf.3.4.10

Erdogan, B. 2013. Changes in antioxidant propertiies during paprika pastes and purees production. The M.Sc.Thesis, Ondokuz Mayıs University, Samsun, Turkey, 128.

Gogus, F., Ozel, M.Z., Keskin, H., Kocak Yanık, D. and Lewis A.C. 2015. Volatiles of Fresh and Commercial Sweet Red Pepper pastes and pureess: processing methods and microwave assisted extraction. *International Journal of Food Properties*, **18(8)**, 1625-1634. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.923910

González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Luna-Ortega J. G., Pérez-Morales, R., Ortiz, J.C.R and García-Hernández, J.L. 2013. Characterization of different *Capsicum* varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high-performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature. *Molecules*, **18**,13471-13486. https://doi.org/10.3390/molecules181113471

Guloksuz Sahin, N. 2021. Evaluation of aflatoxin risk profile in tomatoes and pepper pastes produced by traditıonal methods. The M.Sc.Thesis, Bilecik Şeyh Edibali University, Bilecik, Turkey, 106.

Guzel, H. 2017. Investigation of the quality attributes and regulations of the domestic and pepper pastes sold in the İzmir market. The M.Sc. Thesis, Ege University, Turkey, İzmir. 62.

Ilić, Z.S., Milenković, L., Šunić, L. and Fallik, L., 2015. Effect of coloured shade-nets on plant leaf parameters and tomato fruit quality,. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **95(13)**, 2660-2667. https://doi.org/10.1002/jsfa.7000

Kasim, M. U. and Kasim, R. 2018. The effects of ultraviolet B (UV-B) irradiation on color quality and decay rate of Capia pepper during postharvest storage. *Food Science and Technology (Campinas*), **38(8**), 363-368. https://doi.org/10.1590/1678-457X.05817

Kaur, R. and Kaur K. 2021. Preservation of sweet pepper purees: effect on chemical, bioactive, and microbial quality. *Journal of Food Science and Technology*, **58(9)**, 3655–3660. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05075-8

Kuleasan, H., and Okur, M. 2012. Industrial production of traditional red pepper paste and prevention of spoilage during storage. *Journal of Food Agriculture & Environment*, **10(2),** 241-246.

Polat, H.E., Zambi, O., Güçer, Y. and Anli, A.S. 2024. Impact of drip irrigation with recycled wastewater on aromatic compound composition in capia pepper (*Capsicum annum L*.). *Sustainability*, 16, 4992. https://doi.org/10.3390/su16124992

Pothakos, V., Samapundo, S. and Devlieghere, F. 2012. Total mesophilic counts underestimate, in many cases, the contamination levels of psychrotrophic lactic acid bacteria (LAB) in chilled-stored food products at the end of their shelf-life. *Food Microbiology*, **32**, .437-443. https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.07.011

Ramalingam, S., Bahuguna, A., Lim, S., Joe, A. R., Lee, J.S., Kim, S.Y. and Kim, M. 2022. Physicochemical, microbial, and volatile compound characteristics of gochujang, fermented red pepper paste, produced by traditional cottage industries. *Foods*, **11**, 375. https://doi.org/10.3390/foods11030375

Sermenli T. and Mavi, K. 2010. Determining the yield and several quality parameters of 'Chili Jalapeno' in comparison to 'Pical' and 'Geyik Boynuzu' pepper cultivars under Mediterranean conditions. *African Journal of Agricultural Research,* **5(20**), 2825-2828.

Sharoba, A.M. 2009. Producing and evaluation of red pepper pastes and purees as new food products. *Annals of Agriculture Science*, **47(2)**, 151-165.

Sheskin, D.J. 2003. Parametric and Nonparametric Statistical Procedures, Handbook 3. Edn. Chapman and Hall/CRC, New York, USA, 669-684.

SPSS ''SPSS 25 for Windows. Release 25.0 statistical software version'', SPSS Inc. Chicago, IL, USA, 2021.

Tapki, N. and Sacmalioglu, A. 2023. Factors affecting consumers' preferences for consumption of pepper paste: example of Osmaniye-Bahçe District, Türkiye. *Türkiye Journal of Agriculture Research*, **10(2)**, 191-198.

Yilmaz, E. 2020.Valorization of capia pepper seed flour in breakfast sauce production. *Waste and Biomass Valorization*, **11**, 6803-6813. https://doi.org/10.1007/s12649-020-00939-0

Internet References

1-Palabıyık, M. 2024. Üretimi, tüketimi, ihracatı artan değerli bir sebze: kapya biber, https://www.harmantime.com.tr/uretimi-tuketimi-ihracati-artan-degerli-bir-sebze-kapya-biber/, (25.09.2024)

2- Kapya biber üretiminde o ilimiz Türkiye'de ilk sırada, https://www.yeniasir.com.tr/ege/mugla/2024/08/02/kapya-biber-uretiminde-o-ilimiz-turkiyede-ilk-sirada, (25.09.2024)

3- Turkish Food Codex Communique on Paste and Similar Products (Communique No: 2020/19), https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/08/20200813-5.htm (25.09.2024).

4- Turkish Food Codex Microbiological Criteria Regulation https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/12/20111229M3-6.htm. (25.09.2024)

5-.Pepper Paste and Puree standard (TSE 7896), https://www.baib.gov.tr/files/downloads/PageFiles/33912036-38af-eb11-a8f8-000c29511bae/Files/ek-3.pdf (25.09.2024).

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1594331
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045601 (854-864)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045601 (854-864)

CTP Boyuna ve Enine Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışları

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 02.11.2024
Kabul/Accepted: 19.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams With GFRP Longitudinally Bars And Gfrp Transverse Reinforcement

Saruhan KARTAL*, Uğur GÜNDOĞAN, İlker KALKAN

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Korozyona uğramama özellikleri sayesinde cam takviyeli polimer (CTP) donatıların kullanım alanı genişlemekte her geçen gün daha fazla ilgi görmektedir. CTP'den üretilmiş boyuna ve enine donatıların kullanıldığı çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. CTP donatıların bükülememesi nedeniyle CTP etriyeler 90° kanca açısına sahip olacak şekilde fabrikada üretilmektedir. Biri referans olmak üzere toplam beş adet CTP donatılı betonarme kirişin dört nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Referans kiriş CTP boyuna donatılara ve çelik etriyelere (135° kanca açısı) sahiptir. Çalışmada parametreler olarak, iki farklı *a/d* oranı ve iki farklı etriye aralığı tercih edilmiş ve bu parametrelerin kiriş kesme ve eğilme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda ilgili parametrelerin kirişlerin kırılma modu, enerji sönümleme kapasitesi, yük deformasyon ilişkisi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca farklı yönetmelik ve modellerce önerilen kesme ve eğilme kapasitesi ifadeleri kullanılarak tahminler yapılmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler *CTP* Etriye; *CTP Donatılı Betonarme Kiriş; Eğilme Davranışı; Kesme Davranışı*

Abstract

Due to their corrosion resistance properties, the use of glass fiber reinforced polymer (GFRP) reinforcement is expanding and gaining increasing attention day by day. Studies utilizing longitudinal and transverse reinforcements made of GFRP are growing in number. Since GFRP reinforcements cannot be bent, GFRP stirrups are manufactured in factories with a 90° hook angle. Four-point bending tests were conducted on a total of five GFRP-reinforced concrete beams, one of which served as a reference. The reference beam was reinforced with GFRP longitudinal reinforcements and steel stirrups (135° hook angle). In the study, two parameters were considered: two different *a/d* ratios and two different stirrup spacings. The effects of these parameters on the shear and flexural behavior of the beams were investigated. Within this scope, the influence of these parameters on the failure mode, energy dissipation capacity, and load-deformation behavior of the beams was determined. Additionally, shear and flexural capacity predictions were made using expressions proposed by various codes and models, and the results were compared with experimental data. The results showed a good agreement with the experimental findings.

Keywords *GFRP Stirrup, RC Beam with GFRP Reinforcement, Flexural Behaviour, Shear Behavior*

1. Giriş

Çelik donatının korozyona uğraması, yapıların hizmet ömrünü kısaltmakta ve yüksek bakım ve onarım maliyetlerine yol açmaktadır. Bu sorunun çözümü olarak, korozyona dayanıklı özellikleriyle dikkat çeken lif takviyeli polimer (FRP) donatılar, çelik donatıya alternatif olarak ortaya çıkmıştır. FRP donatılar, üretildikleri lif türüne göre adlandırılır ve en yaygın türleri cam elyaf (GFRP), bazalt (BFRP), karbon (CFRP) ve aramid (AFRP) olarak sıralanabilir. Ülkemizde GFRP donatılar, genellikle Cam Takviyeli Polimer (CTP) olarak da adlandırılmaktadır. Maliyetinin uygun ve kullanım alanı en geniş olan FRP donatı tipi, GFRP (CTP)'dir. Geleneksel çelik donatılara kıyasla CTP'ler oldukça farklı mekanik özeliklere sahiptir. CTP donatıların en belirgin avantajı, korozyondan etkilenmemesidir. Yüksek çekme dayanımına sahip olma ve hafif olması da diğer önemli özellikleridir. Ancak CTP donatılar akma karakteristik özelliğine sahip olmaksızın düşük birim deformasyon değerlerinde kopmakta ve çelik donatılara nispeten düşük elastisite modülü değerlerine sahiptir. Yani süneklik ve kullanılabilirlik sınır durumu problemlerine sebebiyet vermektedir (Kartal vd., 2023). Peng vd. (2025), CTP donatılı donatılı sürekli betonarme derin kirişlerin kesme kuvveti aktarım mekanizmasını incelemişlerdir. CTP etriye oranının ve *a/d* oranının parametreler olarak belirlendiği çalışmada beş büyük ölçekli iki açıklıklı CTP donatılı kirişin eğilme testler gerçekleştirilmiştir. Kritik kesme çatlağı oluşumunun ardından kirişlerde kesme kırılması gerçekleştiği belirtilmiştir. *a/d* oranının azalması veya CTP etriye oranının artırılması kesme dayanımını artırmıştır. Liang vd. (2023), enine ve boyuna donatıları CTP olan kirişlerin

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Saruhan KARTAL e-posta/e-mail: saruhankartal@kku.edu.tr

kesme davranışları üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Kesme dayanımına etki eden faktörler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Betonun kesmeye katkısının önemi vurgulanmış, betonda lif kullanımı ile beton çatlama dayanımını artırarak, çatlama sonrası performansı iyileştirdiği ifade edilmiştir. Kesme dayanımına CTP etriyelerin katkısının kritik bir öneme sahip olduğu ifade edilmiştir. Ancak, CTP etriyelerin büküm noktalarındaki lif açılarındaki değişiklik nedeniyle çekme kapasitesine ulaşamadan bu noktalardan koptuğu vurgulanmıştır.

Çalışmada ayrıca; dayanıklılık, yangın dayanımı ve gelecekteki ihtiyaçlar başlıkları üzerinde durulmuştur. Al-Hamrani ve Alnahhal (2021), BFRP boyuna donatılar ve CTP etriyeler kullanarak betonarme kirişlerin kesme davranışlarını inceledikleri çalışmalarında; donatı oranı, bazalt lif miktarı, *a/d* oranı ve etriye aralığını parametreler olarak belirlemişlerdir. Donatı ve lif oranının artmasıyla kesme dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. CSA S806-12 (2012) ile yüksek uyumlu tahminler yapılmıştır. *a/d* oranının 3,3'ten 2,5'a düşmesiyle yük kapasitesinin yaklaşık %46 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, kırılma türü basınç kesme kırılmasından eğik kesmeye dönüşmüştür. Enine donatı aralığının 250 mm'den 170 mm'ye düşürülmesiyle, yük kapasitesinde yaklaşık ortalama %20'lik bir artış sağlanmıştır. Tüm yönetmeliklerce hesaplanan kiriş kesme dayanımları güvenli tarafta kalmıştır. Han ve arkadaşları (2023), CTP etriyeli ancak boyuna donatıları çelik-CTP (hibrit) kompozit boyuna donatılardan üretilmiş olan kirişlerin kesme davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, hibrit boyuna donatılı kirişlerin kesme kapasitesinin tahmini için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Said vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beton basınç dayanımı ile CTP etriye oranı değişkenler olarak seçilmiş olup *a/d* oranı 2'dir. Yaklaşık 216 mm ve 150 mm etriye aralıklarına sahip olan elemanların kesme kapasiteleri etriyesiz deney elemanlarına kıyasla, sırasıyla yaklaşık %41 ve %82 oranında artış göstermiştir. Beton basınç dayanımının artışıyla, kesme dayanımları yaklaşık %49-104 oranında artış göstermiştir. Analitik çalışma neticesinde, CTP enine donatıların kesme dayanımı için yeni bir model geliştirilmiş ve bu model, önceki çalışmalarda yer alan deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Jumaa ve Yousif (2019); *a/d* oranını sabit tuttukları, etriye aralığını ve donatı etkili derinliğini değişken olarak seçtikleri çalışmada BFRP donatılı kirişlerde boyut etkisinin kesme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Boyutlardaki değişimin, kiriş kesme davranışı üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Ayrıca, CTP etriye birim deformasyon sınır değeri için yeni bir ifade geliştirilmiştir. Li vd. (2022), CTP etriyelerin büküm noktalarındaki lif açısındaki değişimler ile gerilme yığılmaları nedeniyle dayanımlarının düşük olduğunu ve bu sebeple karbon kumaşların birleştirilmesi yoluyla enine donatı olarak kullanıldığı betonarme kirişler üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Li vd. (2022), beşi CTP etriyeli biri çelik etriyeli toplam altı betonarme kirişin kesme davranışını deneysel olarak irdelemişlerdir. Etriye türü, *a/d* oranı ve etriye aralığı gibi parametrelerin kırılma modları, kesme çatlak genişliği, kesme kapasitesi ve donatı birim deformasyonu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. *a/d* oranı artışı ile kiriş kesme dayanımının azaldığı ancak CTP etriyelerdeki birim uzamanın artış gösterdiği tespit edilmiştir. Duic vd. (2018), dört ayrık BFRP parçasını birleştirerek etriyeler oluşturmuş ve BFRP donatılı kirişler üretmiştir. Bu tipte etriyeli deney elemanlarının kesme kırılmasına maruz kaldığı ve CSA S806-12 (2012) yönetmeliği ile yapılan tahminlerin güvenli tarafta kaldığı belirtilmiştir. Issa vd. (2016), BFRP donatılı ve enine donatılı/donatısız betonarme kirişlerin kesme davranışları üzerine bir araştırma yapmışlardır. *a/d* oranı etriyesiz kirişler için 5,65 ve 7 olarak, etriyeli kirişler için ise 1,5; 2,5 ve 3,5 olarak belirlenmiştir. Kesme dayanımını tahmin etmek için önerilen modeller ve mevcut yönetmelikler değerlendirilmiştir. ACI 440.1R-15 (2015) ile gerçekleştirilen tahminler bütün kirişler için oldukça güvenli iken; CSA S806-12 (2012) ile, etriyesiz ve yüksek donatı oranına sahip elemanlar ile etriyeli ve düşük *a/d* oranına sahip elemanlarda güvenli tarafta kalan tahminler elde edilmiştir. Razaqpur ve Spadea (2015) CTP donatılı kirişlerde kesme kuvveti aktarım mekanizmalarını ve bunların Kanada yönetmeliklerinde hesaba nasıl dahil edildiğini incelemişlerdir. Çalışmada 300'den fazla CTP donatılı kirişin deneysel ve tahmini kesme dayanımı verilerini kullanılmıştır. Kanada yönetmeliklerinin kesme dayanımlarını, güvenli tarafta kalan ve deneysel verilerle yüksek uyum içinde tahmin ettiği gösterilmiştir.

Yönetmeliklerde, CTP donatılı betonarme kirişlerin kesme hesaplamaları yapılırken iki temel bileşenin etkisi göz önünde bulundurulur. Bunlar betonun (V_c), enine donatıların (V_f) katkılarıdır. Çelik donatılı kirişlerde betonun kesme dayanımına katkısı CTP donatılı kirişlere göre çok daha fazladır. Bu duruma sebep olan temel faktör CTP donatılarının düşük elastisite modülü değerine sahip olmasıdır. Elastisite modülünün düşüklüğü, çatlak genişlikleri ve derinliklerini artırmaktadır. Çatlakların daha derinleşmesi, basınç bölgesinde derinliğinin azalmasına yani çatlamamış beton kısımdaki betonun kesme dayanımının azalmasına neden olur. Daha geniş çatlaklar ise agrega kenetlenmesinin zayıflamasına, çatlaklar boyunca iletilen çekme gerilmelerinin etkisini azaltmaya

ve boyuna donatının kaldıraç etkisinin düşmesine neden olur. Kirişlerde kesme kuvvetleri nedeniyle kemer etkisinin ortaya çıkması kesme açıklığının (*a*) donatı faydalı yüksekliğine (*d*) oranına (*a/d*) bağlıdır. Gerçekleştirilen çalışmalar; *a*/*d*<2,5 olması halinde gergili kemer davranışının gözlemlendiğini, ancak *a*/*d*>2,5 olması durumunda kemer etkisinin gözlemlenmediğini göstermiştir (MacGregor ve Wight ,2006).

Çelik etriyeler bükülebilme özelliğine sahip olup kancaları 135° olması durumunda maksimum sargılama etkisi elde edilir. Ancak fabrikada üretilen ve bükülebilme özelliği olmayan CTP etriyelerin 90° kanca açısına sahiptir. CTP etriyelerin dayanımı düz CTP donatısından oldukça düşüktür. Bu durum büküm noktalarındaki lif açısının değişiminden kaynaklanmaktadır. Farklı yönetmelikler büküm noktalarındaki kopma birim deformasyonu için farklı birim uzama sınır değerleri önermekte ve buna göre etriye dayanımını belirlemektedir. Bu değerler ACI 440.1R-15 (2015), CSA S806-12 (2012) ve JSCE-97 (1997) yönetmeliklerinde sırasıyla 0,004; 0,005 ve 0,0025'tir.

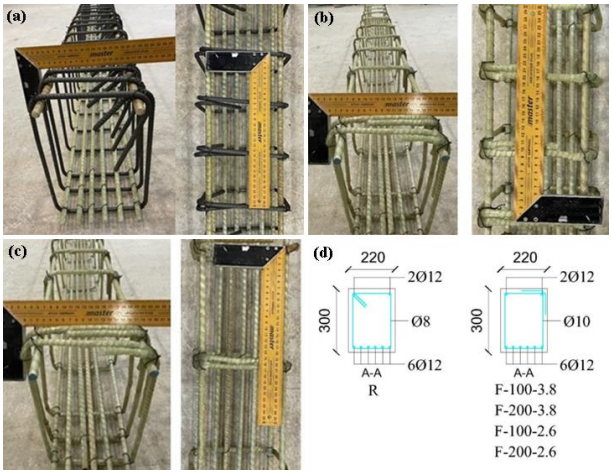
Mevcut çalışmada, yerel üretim CTP boyuna ve enine donatıların kullanılmıştır. Ana deney parametreleri etriye aralığı ve *a/d* oranı olarak belirlenmiş olup CTP enine ve boyuna donatılı kirişlerin eğilme ve kesme davranışları, taşıma gücü, enerji sönümleme kapasitesi ve yük deformasyon eğrileri irdelenmiştir. Ayrıca farklı yönetmelik ve modellerin kullanılmasıyla kirişlerin eğilme ve kesme kapasiteleri tahmin edilmiş ve gerekli değerlendirmeler yapılmıştır. Yerel üretim CTP donatıların kullanılmasıyla gerçekleştirilecek deneysel çalışmaların ve verilerin artışı gelecekte hazırlanacak olan yönetmelikler için büyük önem arz etmektedir.

2. Deneysel Çalışma

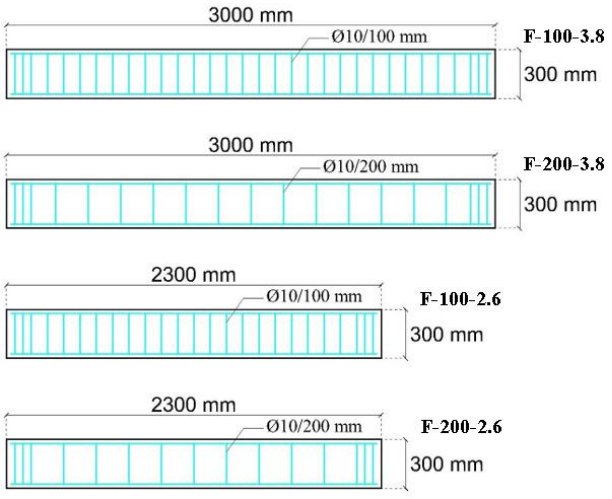
2.1 Deney Elemanları ve Malzeme Mekanik Özellikleri

Çalışmada beş adet ½ ölçekli kiriş yer almaktadır. Deney elemanlarının en kesit ölçüleri 220×300 mm'dir. Bu elemanlardan üçü 3000 mm, diğer ikisi ise 2300 mm uzunluktadır. Çalışmada iki temel parametre mevcuttur ve deney elemanlarının buna göre hazırlanmıştır. Bunlar; etriye aralığı ve *a/d* oranı olarak belirlenmiştir. Kiriş uzunluklarının iki farklı değere sahip olması, iki farklı *a/d* oranına (2,6 ve 3,8) sahip kirişler üretebilmek içindir. Çalışmada 10 mm çaplı CTP fabrikasyon ve 8 mm çaplı çelik etriyeler (Şekil 1) kullanılmıştır. CTP etriyeler 90°'lik kancalara sahip iken çelik etriyeler ise 135° kancalara sahip olacak şekilde imal edilmiştir. Etriye aralıkları ise 100 ve 200 mm'dir.

CTP'li deney elemanlarının tamamının kesme kırılmasına maruz kalma ihtimaline karşı *a/d* =3,8 olan ve 100 mm aralıkta çelik etriyeli bir referans deney elemanı (R) çalışmaya dahil edilmiştir. Ayrıca, R deney elemanında etriye kancaları 135° bükülmüştür. Deney elemanları ile ilgili detaylar Tablo 1'de, donatı detaylarına ise Şekil 2'de yer verilmiştir. Kirişlerin isimlendirmesi hususunda ilk harf (F) kirişlerde fabrikasyon CTP etriyenin kullanıldığını göstermektedir. ''100'' ve ''200'' sayıları etriye aralıklarını, ''3,8'' ve ''2,6'' sayıları ise a/d oranlarını ifade etmektedir. Bütün deney elemanlarında aynı miktarda çekme ve basınç donatısı mevcuttur. Altı adet 12 mm çaplı ve iki adet 10 mm çaplı CTP donatısı sırasıyla çekme ve basınç bölgelerinde yer almaktadır. 10 adet 100 x 200 mm silindir numune ve 20 adet 150 x 150 x 150 mm küp numunenin ve ortalama basınç dayanımı boyut etkisi de dikkate alınarak 21,92 MPa olarak belirlenmiştir. Çalışmada CTP boyuna donatı olarak Ø12, etriyelerde Ø10 donatı tercih edilmiştir. Eksenel çekme testleri neticesinde CTP donatıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ø12 ve Ø10 donatıların sırasıyla, çekme dayanımları ortalama yaklaşık 924 MPa ve 787 MPa ve elastisite modülü ise ortalama yaklaşık 55 GPa ve 42 GPa'dır.



Şekil 1. (a) 100 mm aralıklı çelik, **(b)** 100 mm aralıklı CTP, **(c)** 200 mm aralıklı CTP etriyeler, **(d)** Çelik ve CTP etriye şemaları



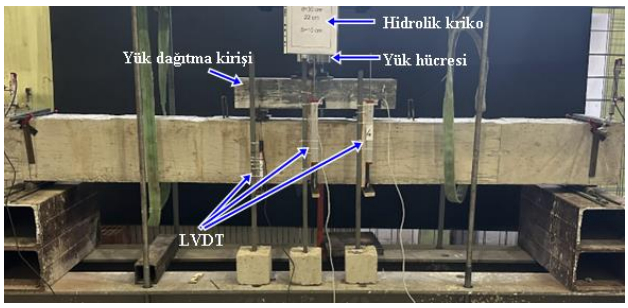
Şekil 2. Kirişlerin donatı detayı (Gündoğan, 2023)

Tablo 1. Kirişlere ait detaylar

Kiriş	Etriye Tipi	Etriye aralığı (mm)	*a/d* oranı	Etriye kanca açısı
R	Çelik	100	3,80	135°
F-100-3.8	CTP	100	3,80	90°
F-200-3.8	CTP	200	3,80	
F-100-2.6	CTP	100	2,60	
F-200-2.6	CTP	200	2,60	

2.2 Test Düzeneği

Kirişlerin dört nokta eğilme testleri Kırıkkale Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yer alan çerçeve kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidrolik kriko yardımıyla yük sisteme aktarılmış ve yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Yük kirişe yük dağıtıcı kiriş yardımıyla iki noktadan uygulanmıştır. Bu noktalar kiriş orta noktasından 250'şer mm uzaklıkta yer almaktadır. Mesnetler ise, 3000 ve 2300 mm uzunluktaki kirişler için kiriş orta noktasına sırasıyla 1350 ve 1000'er mm uzaklıkta yer almaktadır. Sehimler, altı adet potansiyometre kullanılarak ölçülmüştür. Potansiyometreler kirişin orta noktasının ön/arka yüzüne, her iki yük ve mesnet noktalarına yerleştirilmiştir. Sehim ve yük değerleri veri toplayıcı ile senkronize olarak kaydedilmiştir. Test düzeneği Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği

3. Bulgular

3.1 Kırılma Modları ve Yük Deformasyon İlişkisi

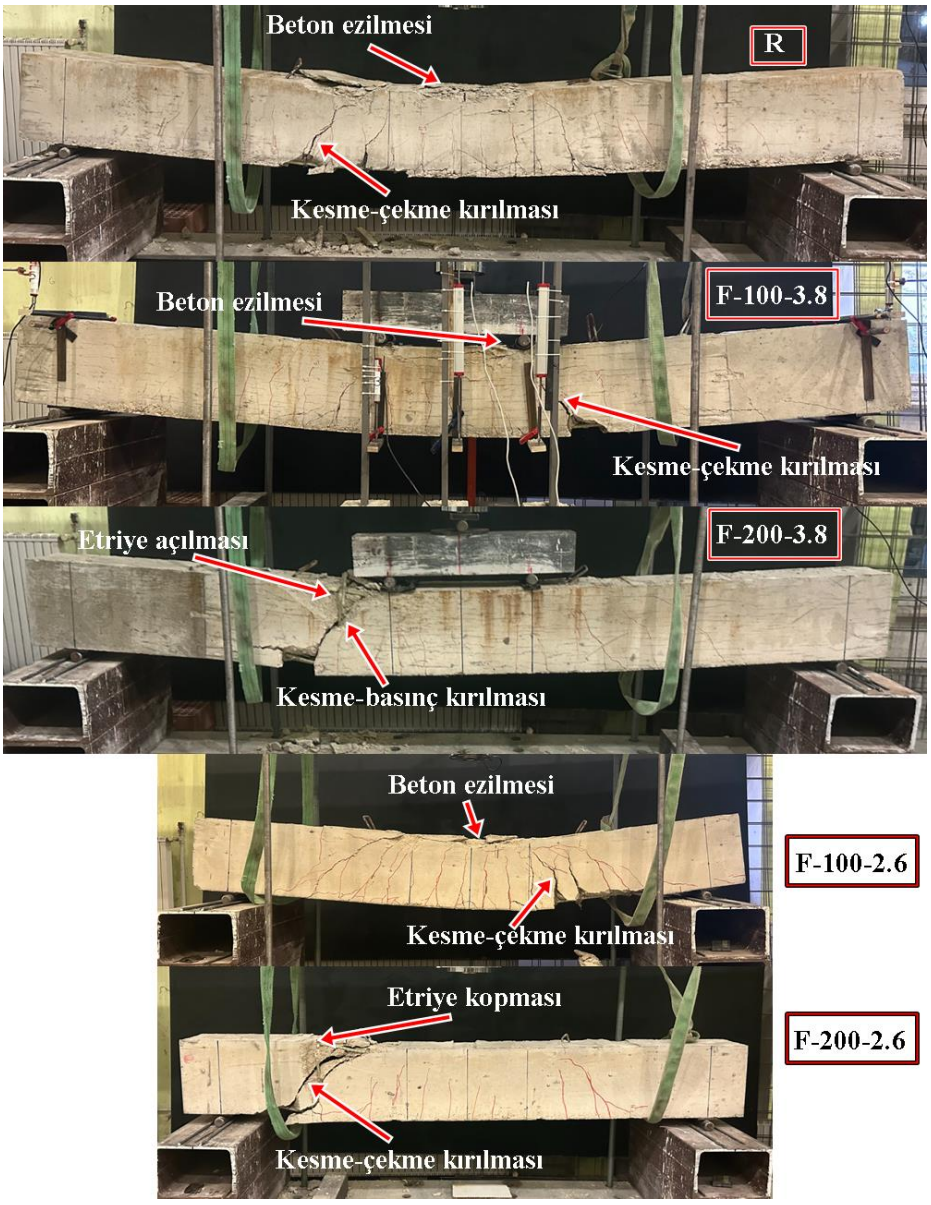
Çalışmada çekme donatı oranı (ρ_f=0,011) ACI 440.1R-15 (2015) dengeli donatı oranının (ρ_{fb}) yaklaşık 4,26 katı seçilerek kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin yüksek olması sağlanmıştır. $\rho_f>\rho_{fb}$ seçilmesiyle birlikte eğilme kapasitesine ulaşan deney elemanlarının hiçbiri CTP donatısının kopmasıyla değil betonun ezilmesi neticesinde taşıma gücüne ulaşması sağlanmıştır.

R deney elemanında, sabit moment bölgesinde betonda ezilme başlangıcı yaklaşık 145 kN değerinde tespit edilmiştir. Yaklaşık 172 kN yük değerinde, ana kesme çatlağı derinleşmiş, aderans çatlağı belirginleşmiş ve beton basınç bölgesiyle birleşmiştir. R elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Beton ezilir ezilmez kesme-çekme kırılması da gerçekleşmiştir. Eğilme taşıma gücü kapasitesine ulaşan F-100-3.8 elemanında, yük değeri yaklaşık 110 kN'a ulaştığında kesme çatlakları belirginleşip basınç bölgesine doğru derinleşmeye başlamış ve aynı zamanda yük-deformasyon eğrisi yataylaşmıştır. Yaklaşık 130 kN'a ulaşıldığında ise, ilk beton ezilme belirtileri başlamış ve yaklaşık 160 kN değerinde, betonun ezilmesinin hemen ardından kesme-çekme kırılması meydana gelmiş ve göçme gerçekleşmiştir. CTP donatı seviyesindeki aderans kaybı, betonda belirgin ayrışmalara yol açmış ve kesme-çekme kırılmasına neden olan ana çapraz çekme çatlağı betonun ezilmesini de tetiklemiştir. F-200-3.8 elemanında, yük yaklaşık 70 kN seviyesine ulaştığında kesme çatlakları yataylaşmış ve 125 kN civarına gelindiğinde ise kesme-basınç kırılması gerçekleşmiştir. Kesme bölgesinde yer alan ve sol yük noktasına en yakın olan etriye açılmıştır. Hemen ardından da basınç donatısı burkulmuştur. Burkulma sırasında basınç donatısı, betonun ve bağ telinin etkisiyle kesilmiştir. Düşük sertliğe sahip olan CTP malzemesi, yüksek gerilme değerlerine maruz kaldığında metalik bağ tellerinden dahi olumsuz etkilendiği sonucunu ortaya koymaktadır.

F-100-2.6 elemanında, yaklaşık 170 kN civarından itibaren beton elastikliğini yitirmeye başlamış ve yük-deformasyon eğrisi yataylaşma eğilimine sahiptir. Yük yaklaşık 215 kN seviyesine ulaştığında sabit moment bölgesinde betonda ezilme başlangıcı tespit edilmiş, yaklaşık 235 kN değerinde ise beton ezilerek eğilme kırılması meydana gelmiştir. Bunu takiben ani bir kesme-çekme kırılması meydana gelmiştir. F-200-2.6 elemanında, yük yaklaşık 105 kN seviyesine ulaştığında kesme çatlakları yataylaşmış ve yaklaşık 125 kN'a yaklaştığında etriyelerden birinin büküm noktasından kopmasıyla taşıma gücüne ulaşılmıştır. Bunun ardından, etriyenin devre dışı kalmasıyla kesme yükleri betona aktarılmış ve betonda etriyenin kopmasıyla birlikte eğik çekme kırılması gerçekleşmiştir.

Tüm deney numunelerinin kırılma modları ve yük-deformasyon eğrileri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Tüm kirişler aynı kesit ebatlarına ve aynı boyuna donatı oranına sahiptir. Bu durum ilk çatlama yüklerinin ve çatlama sonrası rijitliklerin neredeyse aynı olmasının sebebidir. Eğilme taşıma gücü kapasitesine ulaşan R, F-100-2.6 ve F-100-3.8 kirişlerinin yük-deformasyon eğrileri rijitliğe bağlı olarak üç farklı bölgeden oluştuğu ifade edilmiştir. İlk çatlama ile rijitlik ani bir şekilde düşmüş, beton elastikliğini yitirene kadar rijitlik yaklaşık olarak sabit kalmış ve ardından beton elastikliğini kaybettikten sonra ise kademeli olarak azalmıştır. Ancak, F-200-2.6 deney elemanında, ilk

çatlamadan sonra rijitlik sabite yakın kalmış olup kesme kırılması sonrasında yük ani bir düşüş göstermiştir. F-200-3.8 deney elemanında ise rijitlik kademeli olarak düşmüştür. Kirişte kesme kırılması sonucu yükte ani bir düşüş meydana gelmiştir. "R" ve aynı kesme açıklığına sahip fabrikasyon CTP etriyeli deney elemanlarının (F-100-3.8) yük-deformasyon eğrilerinin son derece uyumlu olması bu çalışmanın dikkat çeken sonuçlarından biridir. Bu durum, CTP etriyelerin de başarılı bir performans sergileyebileceğini gösterse de F-200-2.6 numunesinde etriyelerden birinin büküm noktasından kopması, CTP etriyelerin bazı durumlarda beklenenden daha düşük performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Deney elemanlarına ait kırılma modları

Tablo 2. Deney elemanlarına ait yük ve enerji sönümleme kapasiteleri

Grup	Kiriş	*a/d* oranı	Yük kapasitesi (kN)	Enerji tüketim Kapasiteleri (kJ)	$P_b/P_{referans}$	$E_b/E_{referans}$
1.	R	3,80	174,72	10,65	1,09	1,09
	F-100-3.8*	3,80	159,79	9,74	1,00	1,00
	F-200-3.8	3,80	126,07	4,77	0,79	0,49
2.	F-100-2.6*	2,60	236,59	9,21	1,00	1,00
	F-200-2.6	2,60	128,3	1,74	0,54	0,19

P_b – kirişlerin yük kapasiteleri
E_b – kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri
$P_{referans}$ – referans kirişlerin yük kapasiteleri
$E_{referans}$ – referans kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri
* – her grupta yer alan referans CTP etriyeli kiriş

3.2 Yük ve Enerji Sönümleme Kapasiteleri

Çalışmada eğilme kırılma türü ile taşıma gücü kapasitesine ulaşan; R, F-100-3.8 ve F-100-2.6 deney elemanları yük ve enerji sönümleme kapasitesi bakımından en iyi kirişlerdir.

F-100-3.8 kirişi, R kirişine benzer olarak eğilme kapasitesine ulaşmış olmasına rağmen hem yük ve hem de enerji sönümleme kapasiteleri R elemanına göre yaklaşık %9'ar daha düşüktür. Bu durum kesme sıfır bölgesinde CTP etriye çapının çelik etriyeninkine göre daha büyük olmasına rağmen sargılama etkisinin çelik etriyeye göre daha düşük olması ile ilişkilidir. Ayrıca CTP etriyelerinin kancalarının 135° bükülememesi de sargılama etkisinin azalmasına neden olan bir diğer önemli faktördür.

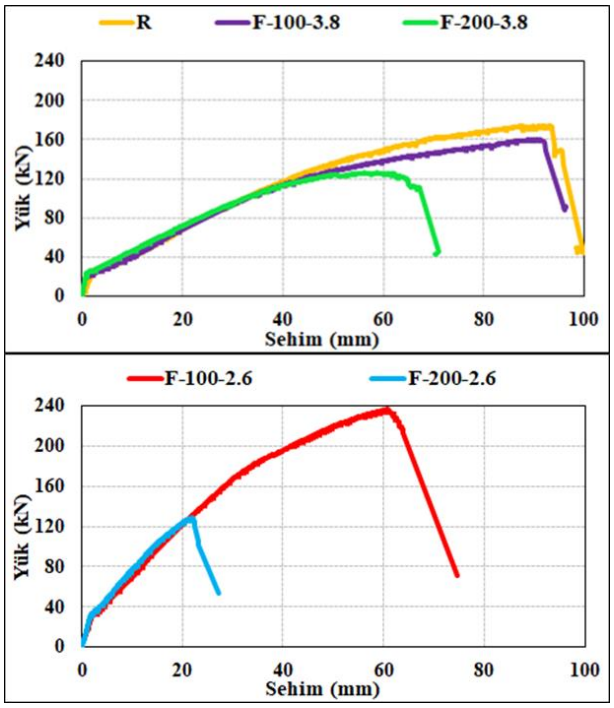
3.3 CTP Etriye aralığı

Şekil 5' te, *a/d* oranı bakımından aynı ancak etriye aralığı farklı deney elemanlarının yük-deformasyon eğrilerine yer verilmiştir. Etriye aralığının 200 mm'den 100 mm'ye düşüşü ile, kırılma modu kesmeden eğilmeye dönüşmüş ve yük ile enerji sönümleme kapasiteleri büyük oranda artış göstermiştir. F-100-3.8 kirişinin F-200-3.8 kirişine göre, yük ve enerji sönümleme kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %21 ve %51 daha yüksektir. F-100-2.6 kirişinin yük ve enerji sönümleme kapasiteleri ise, F-200-2.6 kirişine göre ilgili değerlerinden sırasıyla yaklaşık %46 ve %81 daha büyüktür. F-200-2.6 elemanında meydana gelen bu önemli farklılık, etriyenin beklenmedik bir şekilde düşük birim deformasyon değerlerinde kopmasından kaynaklanmaktadır.

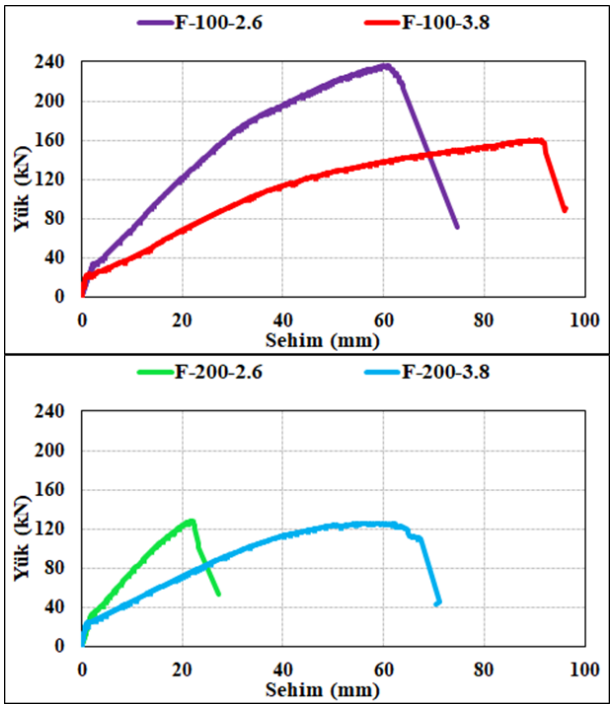
3.4 a/d oranı

Kartal (2024), kemerlenme etkisinin *a/d*<2,5 olan kirişlerde etkin olduğunu ifade etmektedir. Ancak *a/d* >2,5 büyük olan kirişlerde bazı model ve yönetmeliklere göre *a/d* oranının artışıyla beton kesme dayanımın azaldığını ancak bazı modellere göre ise *a/d* oranının kesme dayanımı üzerindeki etkisinin ihmal edildiğini ifade etmiştir.

Şekil 6'da aynı etriye aralığına sahip ancak farklı *a/d* oranına sahip olan kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri birlikte verilmiştir. Bu bölümde *a/d* oranı deneysel kesme dayanımları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ancak kesme dayanımının değişiminde moment kolu uzunluğunun değişiminin de etkisi olduğu unutulmamalıdır. 100 mm etriye aralığına sahip olan CTP etriyeli kirişler eğilme kapasitesine ulaşmış olduklarından yani kesme dayanımları tam olarak belirli değildir. Ancak 200 mm etriye aralığına sahip CTP etriyeli kirişlerde yaklaşık *a/d* oranının 2,6'dan 3,8'e artması ile kesme dayanımında yaklaşık %2'lik bir azalış gözlemlenmektedir. Bu azalışın genellikle V_c (beton kesme dayanımı) azalışından kaynaklandığı ifade edilmiştir.



Şekil 5. Deney elemanlarına ait yük deformasyon eğrileri



Şekil 6. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük deformasyon eğrileri (*a/d* oranı parametresi) (Gündoğan, 2023)

4. Analitik Çalışma

4.1 *Kesme Dayanımı*

Kirişlerin kesme dayanımları farklı yönetmelik ve modellerde betonun (V_c) ve CTP etriyenin katkısı (V_f) olmak üzere iki temel bileşene sahiptir. CTP enine donatılar büküm noktalarında liflerdeki açı değişimi nedeniyle düz CTP donatılara göre kapasitesinden daha

düşük birim uzama değerlerinde ani olarak kopmaktadır. CSA S806-12 (2012), ACI 440.1R-15 (2015), JSCE-97 (1997) yönetmelikleri CTP etriyeler için sırasıyla 0,005; 0,004 ve 0,0025 gibi farklı birim uzama sınır değerleri önermektedir. Bu bölümde, kesme dayanımı hesaplamalarında sıkça kullanılan yönetmelikler ele alınmıştır.

4.1.1 *ACI 440.1R-15 (2015)*

Tureyen and Frosh (2003) tarafından önerilen betonun kesmeye olan katkısı (V_c), ACI 440.1R-15 (2015)'te de önerilmektedir (Denklem (1)). Boyuna donatı eksenel rijitliğinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi, elastik tarafsız eksen derinliğinin (*kd*) ile Denklem (1)'e dahil edilmiştir. Bu ifadede *k* çatlamış dönüştürülmüş kesit tarafsız eksen derinliğinin donatı faydalı yüksekliğine (*d*) oranıdır. Dikdörtgen kesitlerde *k* Denklem (2) yardımıyla hesaplanmaktadır. f_c, b_w, n_f ($n_f=E_f/E_c$) ve ρ_f sırasıyla beton basınç dayanımını, kiriş genişliğini, elastisite modülleri oranını ve boyuna donatı oranını simgelemektedir.

$$V_c = 0,4\sqrt{f_c}\, b_w d\,(kd) \tag{1}$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \tag{2}$$

ACI 440.1R-15 (2015) CTP etriyelerin kesmeye olan katkısı (V_f) için Denklem (3)'ü önermektedir. Bu ifadelerde A_{fv} etriye donatısı kesit alanını, f_{fv} etriye donatı gerilmesini ve *s* etriye aralığını ifade etmektedir.

ACI 440.1R-15 (2015); f_{fv}'nin Denklem (4)'e göre hesaplanmasını önermektedir. Bu ifadeye göre, CTP etriye sınır birim uzama değeri 0,004'tür. Ayrıca CTP etriyenin elastisite modülü E_{fv} ile simgelenmiştir.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \tag{3}$$

$$f_{fv} = 0,004E_{fv} \le f_{fuv} \tag{4}$$

4.1.2 *CSA S806-12 (2012)*

CSA S806-12 (2012), V_c'yi, Razaqpur ve Isgor (2006) tarafından geliştirilen Denklem (5)'e göre hesaplanmasını önermektedir. Bu denklem, beton kesme dayanımını etkileyen moment-kesme etkileşimi (k_m), boyuna donatı eksenel rijitliği (k_r), boyut etkisi (k_s), ve kemer davranışı etki katsayısı (k_a) gibi kritik değişkenleri göz önünde bulundurmaktadır (Denklem (6)). ϕ_c ve λ sırasıyla beton için dayanım ve yoğunluk katsayısını ifade etmektedir. M_f ve V_f ise sırasıyla yük katsayıları dahil edilerek hesaplanmış momenti kesme kuvvetini göstermektedir.

$$V_c = 0,05\lambda\phi_c k_m k_r k_s k_a (f_c)^{1/3} b_w d_v \tag{5}$$

$$k_m = \left(\frac{V_f}{M_f} d\right)^{1/2} \le 1$$

$$k_r = 1 + (\rho_f E_f)^{1/3}$$

$$k_s = \left(\frac{750}{450 + d}\right) \le 1 \tag{6}$$

$$k_a = \left(\frac{2,5V_f}{M_f} d\right) \le 1$$

CSA S806-12'de (2012) V_f ve f_{fv}'nin hesabı için sırasıyla Denklem (7-8)'i yer almaktadır. Etriyenin kapasitesi için bu yönetmelikte 0,005 sınır birim deformasyon değeri önerilmiştir. d_v etkili kesme derinliğini ($d_v=max(0,9d; 0,72h)$ ifade etmektedir. Ayrıca kesme dayanımı hesaplarında deneysel ana kesme çatlağının açısı (*Q*) dikkate alınmıştır.

$$V_f = \frac{0,4\phi_F A_{fv} f_{fv} d_v}{s} \cot\theta \tag{7}$$

$$f_{fv} \le 0,005E_{fv} \tag{8}$$

4.1.3 ISIS-M03-07 (2007)

ISIS-M03-07 (2007) yönetmeliğine göre V_c ifadesi, Denklem (9)'daki gibi donatı etkili derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

$$V_c = \begin{cases} 0,2\lambda\phi_c \sqrt{f_c}\, b_w d \sqrt{E_f / E_s} & d \le 300\ mm \\ \left(\dfrac{260}{1000 + d}\right)\lambda\phi_c \sqrt{f_c}\, b_w d \sqrt{E_f / E_s} & d > 300\ mm \end{cases} \tag{9}$$

ISIS-M03-07 (2007) yönetmeliği, V_f 'nin hesabı için ana kesme çatlağı açısını (θ) da dikkate alan Denklem (10-11)'in kullanılmasını önermektedir. Ayrıca d_v değerinin donatı etkili derinliğinin %90'ına eşit olduğu ifade edilmiştir. Etriye için ise sınır uzama değeri 0,0025'tir.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d_v \cot\theta}{s} \tag{10}$$

$$f_{fv} = 0,0025E_{fv} \tag{11}$$

4.2 Eğilme Dayanımı

CTP donatılı betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasiteleri iki farklı yönetmelik (CSA S806-12, 2012; ACI

440.1R-15, 2015) ve Todeschini beton modeli (1964) kullanılarak tahmin edilmiştir.

4.2.1 ACI 440.1R-15 (2015)

Bu yönetmelikte betonun ezilme birim deformasyonu 0,003 olup, dikdörtgen basınç bloğu derinliğinin tarafsız eksene oranı olarak tanımlanan β_1 Denklem (12)'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca denge üstü donatılı kirişlerde ($\rho_f > \rho_{fb}$) eğilme momenti kapasitesi Denklem (13)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\beta_1 = \begin{cases} f_c \le 28MPa \rightarrow & 0,85 \\ f_c > 28MPa \rightarrow & 0,85 - \dfrac{0,05(f_c - 28)}{7} \ge 0,65 \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho_f > \rho_{fb} \rightarrow$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \quad (13)$$

$$M_u = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c}\right) b_w d^2$$

f_f boyuna CTP donatısındaki nihai gerilme değerini, ε_{cu} betonun ezilme birim deformasyonunu ve M_u eğilme momenti kapasitesini göstermektedir.

4.2.2 *CSA S806-12 (2012)*

Bu yönetmelikte betonun ezilme birim deformasyonu 0,0035 olup, dikdörtgen basınç bloğu derinliğinin tarafsız eksene oranı β_1 ve dikdörtgen basınç bloğu genişliği katsayısı α_1 Denklem (14)'e göre hesaplanmıştır. Tarafsız eksen derinliğine (c) bağlı olarak ve Denklem (15) kullanılarak f_f ve M_u hesaplanmıştır.

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f_c \ge 0,67$$
$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f_c \ge 0,67 \quad (14)$$

$$\alpha_1 \beta_1 f_c b_w c = A_f E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c}\right) \rightarrow c$$
$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c} < f_{fu} \quad (15)$$
$$M_u = A_f f_f \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$

4.2.3 **Todeschini (1964) Beton Modeli**

Bu beton modelinde betondaki gerilme ($f_c(\varepsilon_c)$) betonun birim deformasyonuna (ε_c) bağlı olarak tek bir fonksiyonla ifade edilmektedir (Denklem (16)) Maksimum basınç gerilmesi (f'_c), standart silindir beton basınç dayanımının (f_c) %90'ına karşılık gelmektedir. $\beta_1(\varepsilon_c)$ ve $k_2(\varepsilon_c)$ ise eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun sırasıyla genişlik ve derinlik katsayıları olup ε_c'ye bağlı olarak Denklem (17-18) ile hesaplanmaktadır.

$$f_c(\varepsilon_c) = \frac{2 f'_c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)^2} \quad (16)$$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = \frac{\ln\left[1 + \left(\varepsilon_c / \varepsilon_o\right)^2\right]}{\varepsilon_c / \varepsilon_o} \quad (17)$$

$$k_2(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2\left[\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right) - a\tan\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)\right]}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)^2 \beta_1(\varepsilon_c)} \quad (18)$$

Bu modelde betonun ezilme birim deformasyonu 0,0038 olup, Denklem (19) kullanılarak f_f ve M_u elde edilmiştir.

$$\beta_1(\varepsilon_{cu}) k_2(\varepsilon_{cu}) f_c b_w c = A_f E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c}\right) \rightarrow c$$
$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c} < f_{fu} \quad (19)$$
$$M = A_f f_f \left(d - \frac{k_2(\varepsilon_{cu}) c}{2}\right)$$

4.3 Kesme ve Eğilme Kapasiteleri

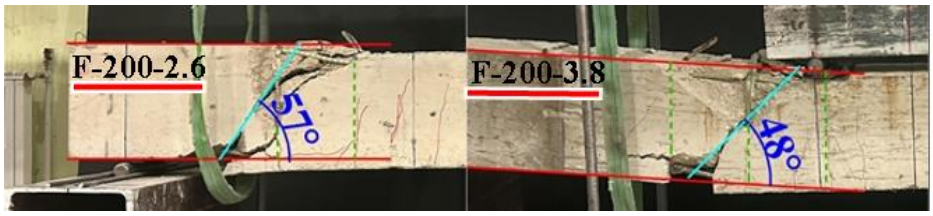
Bu bölümde farklı yönetmelik ve modellerce hesaplanan kesme ve eğilme kapasiteleri deneysel veriler ile karşılaştırılarak değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Kesme ve eğilme tahminleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4' te sunulmuştur. Taşıma gücüne kesme kırılması neticesinde ulaşan kirişlerin ilgili yönetmeliklere göre hesaplanan kesme dayanımları ($V_n = V_c + V_f$) ile deneysel kesme verileri (V_{exp}) Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. CSA S806-12 (2012) ve ISIS M03-07 (2007) yönetmelikleri için deneysel verilerden elde edilen θ değerleri kesme dayanımı hesabında kullanılmıştır (Şekil 7). Kesme dayanımları tahmin edilirken bütün malzeme katsayıları bire eşit olarak alınmıştır.

CTP etriyeli betonarme kirişlerde ACI 440-1R-15 (2015) tarafından önerilen kesme formüllerinden hesaplanan teorik değerlerle deneysel olarak belirlenen kesme kapasitelerinin büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür. Özellikle F-200-2.6 ve F-200-3.8 numunelerinin kapasiteleri yaklaşık maksimum %4'lük farkla tahmin edilmiştir. ACI 440-1R-15 (2015) güvenli tarafta kalacak şekilde tahminler gerçekleştirilmiştir. CSA S806-12 (2012) formüllerinden elde edilen değerler, CTP etriyeli

elemanların deneysel kesme değerleri genel olarak %15-20 mertebesinde altında kalmıştır. CSA S806-12 (2012) ile gerçekleştirilen tahminler ACI 440-1R-15 (2015)'e göre daha güvenli taraftadır. ISIS M03-07 (2007) ise güvenli olmayan sonuçlar vermiştir. F-200-2.6 ve F-200-3.8 deney elemanlarının kesme dayanımları sırasıyla yaklaşık %1 ve %20 deneysel verilerden daha yüksektir.

Tablo 3. Kesme dayanımları

Kiriş	Kırılma Modu	V_{exp} (kN)	ACI 440-1R-15 (2015)		CSA S806 -12 (2012)		ISIS M03-07 (2007)	
			V_n (kN)	V_{exp}/V_n	V_n (kN)	V_{exp}/V_n	V_n (kN)	V_{exp}/V_n
F-200-3.8	Kesme	63,035	61,92	1,018	53,07	1,188	78,37	0,804
F-200-2.6	Kesme	64,150	61,92	1,036	56,80	1,129	65,11	0,985



Şekil 7. Ana kesme çatlakları (Gündoğan, 2023)

Tablo 4. Deney elemanlarının eğilme kapasiteleri

Kiriş	Kırılma Modu	P_{exp} (kN)	$P_{n\text{-}ACI}$ (kN)	$P_{n\text{-}CSA}$ (kN)	$P_{n\text{-}Todes.}$ (kN)	$P_{exp}/P_{n\text{-}ACI}$	$P_{exp}/P_{n\text{-}CSA}$	$P_{exp}/P_{n\text{-}Todes.}$
R	Eğilme+Kesme	174,72	128,49	138,90	137,91	1,36	1,26	1,27
F-100-3.8	Eğilme+Kesme	159,79	128,49	138,90	137,91	1,24	1,15	1,16
F-100-2.6	Eğilme+Kesme	236,59	188,45	203,72	202,26	1,26	1,16	1,17

P_{exp} – kirişlerin deneysel yük kapasiteleri
$P_{n\text{-}ACI}$ – ACI 440.1R-15'e göre kirişlerin yük kapasiteleri
$P_{n\text{-}CSA}$ – CSA S806 -12'ye göre kirişlerin yük kapasiteleri
$P_{n\text{-}Todes}$ – Todeschini modeline göre kirişlerin yük kapasiteleri

Tablo 4'te, CTP enine/boyuna donatılı kirişlerin eğilme kapasiteleri yönetmelikler ve modeller kullanılarak tahmin edilmiş ve deneysel yük değeri (P_{exp}) ile karşılaştırılmıştır. Eğilme kapasitesine ulaşmış deney elemanları için, her iki yönetmelik ve Todeschini modeli (1964) kullanılarak gerçekleştirilen tüm tahminler deneysel verilerden düşüktür. En güvenli sonuçlar ACI 440.1R-15 (2015), deneysel verilere en yakın sonuçlar ise CSA S806-12 (2012) ile tahmin edilmiştir. F-100-3.8 deney elemanı için, analitik eğilme kapasiteleri tüm yöntemlerle deneysel verilere en yakın olacak şekilde tahmin edilmiştir. R deney elemanın deneysel eğilme kapasitesi çelik etriyenin ve kanca açısının sargılama etkisini artırması nedeniyle daha büyüktür. Bu durum sargılama etkisini göz önünde bulundurmayan yönetmelik ve modellere göre deneysel sonuçların en yüksek çıkmasının temel sebebidir.

5. Sonuçlar

Mevcut çalışmada CTP donatılı beş adet betonarme kirişin dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve kesme davranışları irdelenmiştir. Çelik etriyeli bir referans kiriş de çalışmaya dahil edilmiştir. Değişkenler olarak CTP etriye aralığı ve a/d oranının belirlendiği çalışmada bu değişkenlerin; yük ve enerji sönümleme kapasiteleri ile kırılma modu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elemanların deneysel kesme değerleri, ACI 440-1R-15 (2015), CSA S806-12 (2012), ISIS M03-07 (2007) yönetmeliklerinde yer alan analitik ifadeler; deneysel eğilme kapasiteleri ise ACI 440-1R-15 (2015), CSA S806-12 (2012) ve Todeschini beton modeli (1964) kullanılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel ve analitik çalışma neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Aynı a/d oranına sahip olan ve eğilme taşıma gücüne ulaşan F-100-3.8 ve R elemanlarının yük ve enerji sönümleme kapasiteleri arasında yaklaşık %9'luk bir fark mevcuttur. Bu durum CTP etriyenin çelik etriyeye göre düşük sargılama etkisi ile açıklanabilir. Ayrıca CTP etriye kanca açısının 90° olması da bu sargılama etkisinin azalmasının bir diğer nedenidir.
- F-100-3.8 gibi F-100-2.6 kirişi de eğilme taşıma gücüne ulaşmıştır. Bu elemanlarda, CTP etriyelerin etkinliği neticesinde beton ezilmeden önce kesme kırılmalarının gerçekleşmesi engellenmiştir.
- Etriye aralığının artışıyla (100 mm yerine 200 mm), eğilme kırılma türü yerini kesme kırılma türüne

bırakmıştır. Etriye aralığının artışı aynı zamanda, kirişlerin süneklik, yük ve enerji sönümleme kapasitesinde büyük miktarda azalmalara neden olmuştur.

- F-200-2.6 kirişi, kesme bölgesinde yer alan etriyelerden birinin büküm noktasından kopması neticesinde taşıma gücüne ulaşmıştır. Bu durum bu kirişteki düşük yük ve enerji sönümleme kapasitesinin nedeni olarak gösterilmiştir.
- ACI 440-1R-15 (2015) ile hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin, deneysel kesme dayanım değerleri ile önemli ölçüde uyumludur. Ancak CSA S806-12 (2012) ile hesaplanan kesme dayanımı değerleri, deneysel değerlerin yaklaşık %15-20 altında olup daha güvenli tarafta kalmıştır.
- Eğilme kapasite tahminlerinin tamamı güvenli tarafta kalmıştır. En güvenli sonuçlar ACI 440.1R-15 (2015), deneysel verilere en yakın sonuçlar ise CSA S806-12 (2012) kullanılarak elde edilmiştir. F-100-3.8 deney elemanı için, analitik eğilme kapasiteleri tüm yöntemlerle deneysel verilere en yakın olacak şekilde tahmin edilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Prof. Dr. İlker KALKAN ve Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL danışmanlığında 2023 yılında tamamladığımız "Ayrık Çubuk ve Kapalı Etriye Şeklinde FRP Kesme Donatısı Bulunduran FRP Boyuna Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışları" başlıklı yüksek lisans tezi (Tez no: 831657) esas alınarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir Sahibi, Araştırma, Deney, Deney Tasarımı, Yazma/orijinal taslak, Danışmanlık, Doğrulama

Yazar 2: Araştırma, Kaynaklar, Deney, Biçimsel analiz, Metodoloji, Yazma – orijinal taslak,

Yazar 3: Denetleme, Analiz, Danışmanlık, Yazma –orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Çalışmanın gerçekleşmesinde altyapı imkanlarından yaralandığımız Kırıkkale Üniversitesine teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

ACI-440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP), 2015: ACI 440. 1R-15, American Concrete Institute, Farmingtons, Hills, MI.

Al-Hamrani, A., & Alnahhal, W., 2021. Shear behavior of basalt FRC beams reinforced with basalt FRP bars and glass FRP stirrups: Experimental and analytical investigations. *Engineering Structures*, ***242***, 112612. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112612

CSA, 2012, Code for the Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers, in CAN/CSA/S806-12, Canadian Standard Association, Toronto, Ontario, Canada, , 198.

Duic, J., Kenno, S., & Das, S., 2018. Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar. *Construction and Building Materials*, ***176***, 470-481. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.208

Gündoğan, U., 2023. Ayrık çubuk ve kapalı etriye şeklinde FRP kesme donatısı bulunduran FRP boyuna donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışları, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, 69.

Han, S., Fan, C., Zhou, A., & Ou, J., 2023. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups. *Engineering Structures*, ***278***, 115520. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115520

ISIS, Reinforced Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers – Design Manual No. 3, ISIS Canada Corporation: University of Manitoba, Manitoba, Canada, 2007.

Issa, M. A., Ovitigala, T., & Ibrahim, M., 2016. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups. *Journal of Composites for Construction*, ***20*****(4)**, 04015083. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638

JSCE, 1997, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Concrete Engineering Series 23, A. Machida, ed., Tokyo, 325.

Jumaa, G. B., & Yousif, A. R., 2019. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Construction and Building Materials*, ***209***, 77-94. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.076

Kartal, S., 2024. Etriyesiz FRP Boyuna Donatılı Betonarme Kirişlerin (a/d> 2.5) Kesme Davranışları. *International Journal of Engineering Research and Development*, **16(1)**, 416-431. https://doi.org/10.29137/umagd.1404776

Kartal, S., Kalkan, I., Mertol, H. C., & Baran, E., 2023. Influence of the proportion of FRP to steel reinforcement on the strength and ductility of hybrid reinforced concrete beams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **27(12)**, 3546-

3565.
https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2143429

Li, W., Tang, S., Huang, X., Liu, W., Yang, X., & Shi, T., 2022. Carbon fiber-reinforced polymer mesh fabric as shear reinforcement in reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, ***53***, 104433. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104433

Li, W., Huang, W., Fang, Y., Zhang, K., Liu, Z., & Kong, Z., 2022. Experimental and theoretical analysis on shear behavior of RC beams reinforced with GFRP stirrups. *Structures, **46***, 1753-1763. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.138

Liang, X., Peng, J., & Ren, R., 2023. A state-of-the-art review: Shear performance of the concrete beams reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, ***364***, 129996. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129996

MacGregor, J. G. and Wight, J. K., 2006. *Reinforced concrete: Mechanics and design* (**Vol. 3**). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall

Peng, F., Cai, Y., & Yi, W., 2025. Shear mechanism and strength of large-scale continuous concrete deep beams reinforced with GFRP bars. *Engineering Structures*, **326**, 119524. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119524

Razaqpur, A. G., & Isgor, O. B., 2006. Proposed shear design method for FRP-reinforced concrete members without stirrups. *ACI Structural Journal*, ***103*****(1)**, 93.

Razaqpur, A. G., & Spadea, S., 2015. Shear strength of FRP reinforced concrete members with stirrups. *Journal of Composites for Construction*, **19(1)**, 04014025. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000483

Said, M., Adam, M. A., Mahmoud, A. A., & Shanour, A. S., 2016. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*, ***102***, 574-591. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.185

Todeschini, C. E., Bianchini, A. C., & Kesler, C. E., 1964. Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels. *Journal Proceedings, **61*****(6)**, 701–716. https://doi.org/10.14359/7803

Tureyen, A. K., & Frosch, R. J., 2003. Concrete shear strength: Another perspective. *Structural Journal*, ***100*****(5)**, 609-615

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1582823
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045602 (865-877)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045602 (865-877)

BIM'in Benimsenmesinin Önündeki Engelleri Aşmak için Stratejik Yol Haritası

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.11.2024
Kabul/Accepted: 20.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Strategic Roadmap for Overcoming Barriers to BIM Adoption

Merve KILINÇ YİĞİT, Merve ANAÇ*

Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Gaziantep, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Yapı bilgi modelleme süreçlerini kapsayan BIM (Building Information Modeling) inşaat sektöründe birçok avantajı olduğu bilinmektedir. Ancak gelişmekte olan ülkelerin BIM süreçlerine geçişinde çeşitli dirençlerle karşılaşılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde BIM'in inşaat sektöründeki olumlu etkileri göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye'de bu yöntemin benimsenmesine yönelik bir direnç algılanmakta ve bu direncin nedenleri araştırılmaktadır. Bu çalışma, Türkiye'de BIM'in yaygın olarak benimsenmesinin önündeki engelleri tespit etmeyi, tespit edilen engellerin önem düzeylerinin belirlenerek çözüm önerileri gelirştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada sistematik literatür taraması ile 112 adet makale incelenmiş ve literatürde BIM'e geçiş sürecindeki engeller tespit edilmiştir. Daha sonra Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile bu faktörlerin göreceli önem dereceleri tespit edilmiştir. Ardından göreceli önem dereceleri göz önüne alınarak yol haritası stratejisi geliştirilmiştir. Bu stratejiye bağlı kalınarak dirençlerin ortadan kaldırılmasına yönelik yol haritası geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *BIM (Building Information Modeling), BIM Dirençleri, AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), Yol Haritası.*

Abstract

BIM (Building Information Modeling), which covers building information modeling processes, is known to have many advantages in the construction sector. However, various barriers are encountered in the transition of developing countries to BIM processes. Considering the positive effects of BIM in the construction sector in developed countries, barriers to the adoption of this method in Turkey is perceived and the reasons for this resistance are investigated. This study aims to identify the barriers to the widespread adoption of BIM in Turkey, to determine the importance levels of the identified barriers and to propose solutions. In the study, 112 articles were analysed through a systematic literature review and the obstacles in the process of transition to BIM were identified in the literature. Then, the relative importance levels of these factors are determined by Analytic Hierarchy Process (AHP) method. Then, a road map strategy was developed by considering the importance levels. Based on this strategy, a road map was developed to eliminate the resistances.

Keywords: *BIM (Building Information Modeling); BIM Resistances; AHP (Analytic Hierarchy Process); Road Mapping.*

1. Giriş

İnşaat sektörü, bir ülkenin ekonomik durumunu, gelişmişliğini ve sosyokültürel durumunu yansıtan temel faktörlerden biridir. Son yıllarda gelişmiş ülkelerin yapım, tasarım ve uygulama süreçlerine bakıldığında BIM sistemlerinin kullanımında büyük bir eğilim olduğu görülür. BIM, yenilikçi bir dijital tasarım ve inşaat yönetimi sürecidir. BIM, projenin yaşam döngüsü boyunca bilgiyi entegre etmek, paylaşmak ve yönetmek için kullanılan kapsamlı bir yaklaşımı ifade etmektedir. BIM, bir yapının fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin dijital bir ikizidir. BIM, tasarım, inşaat ve yönetim aşamalarında görev alan tüm paydaşların ortak bir veri havuzundan faydalanmasını sağlayan disiplinler arası işbirliği ve yönetim sürecidir (Arayici vd., 2011). Ayrıca tasarım, inşaat, işletme ve bakım gibi bir inşaat projesinin farklı aşamaları arasındaki iletişimi ve işbirliğini geliştirmeyi amaçlamaktadır (Yang vd., 2023). Proje planlama, tasarım, inşaat ve işletme aşamalarında kullanılan bu veri tabanı sayesinde yapının ana hatları, malzeme özellikleri, maliyet bilgileri, program süreleri, tesisat sistemleri ve diğer önemli veriler dijital ortamda saklanabilir ve yönetilebilir (Barqawi vd., 2023). BIM, projenin her aşamasında kullanıcılarına farklı bakış açıları sunar ve karar vermelerinde yardımcı olur (J. Xu vd., 2019). Kaynak verimliliğini artırma ve karmaşık süreçleri yönetme potansiyeli ile mimari, mühendislik ve inşaat endüstrisinde umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmiştir (Ariono vd., 2022).

Gelişmiş ülkelerle karşılaştırıldığında Türkiye BIM'in kullanımında başlangıç aşamasında olduğu ifade edilebilir (Erdik vd., 2020). Bunun kök sebeplerinden biri Türkiye'de BIM kullanımına yönelik direnç olmasıdır (Namlı vd., 2019). BIM süreçlerinin avantajları dikkate alındığında, Türkiye'de BIM kullanımındaki dirençlerin, sektördeki

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Merve ANAÇ e-posta/e-mail: merve.anac@hku.edu.tr

potansiyelin tam olarak değerlendirilmediğini ve verimlilik açısından önemli fırsatların kaçırıldığını işaret etmektedir. Bu bağlamda, Türkiye'de BIM kullanımının yaygınlaşmasını engelleyen faktörlerin tespit edilmesi ve çözüm önerilerinin sunulması büyük önem taşımaktadır. Var olan bu problemin çözümü için öncelikle hangi sıra ile çözülmesine karar verilmelidir. Bu bağlamda BIM' e geçiş sürecindeki engeller tespit edilecek, ardından tespit edilen engeller uzman görüşlerine sunulacak ve faktörlerin birbiri üzerindeki göreceli önem dereceleri tespit edilecektir. Son olarak göreceli önem dereceleri tespit edilen faktörlerin çözümüne yönelik en önemliden en az önemliye doğru çözüm stratejisi geliştirilerek bir yol haritası önerilecektir.

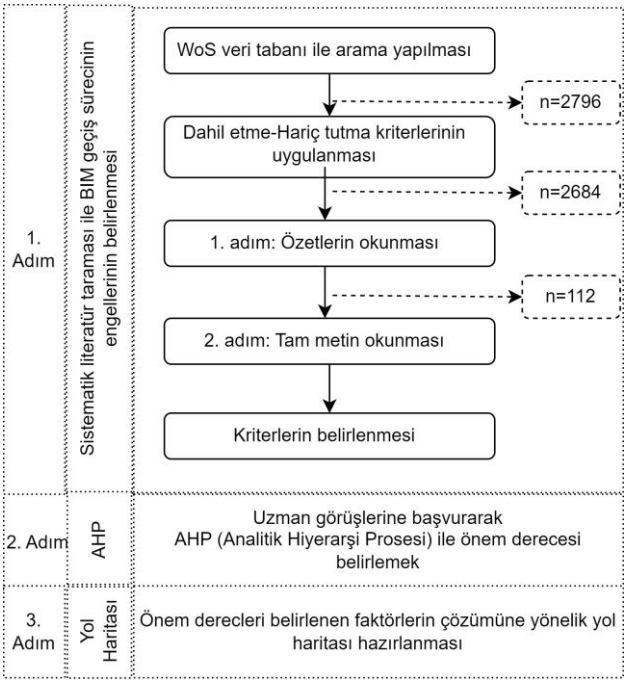
2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında Şekil 1'de gösterilen iş akış süreçleri takip edilmiştir. Buna göre BIM geçiş süreçlerinde karşılaşılan problemlerin tespitine yönelik sistematik literatür taraması (SLR) yöntemi kullanılmıştır. SLR için etki faktörü yüksek ve uluslararası birçok makaleyi bünyesinde bulunduran Web of Science (WoS) veri tabanı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 12 Mayıs 2024 tarihinde yapılan WoS arama protokolü şu şekilde sıralanabilir;

- "BIM Implementation*" (tüm alanlar) veya "Building Information Modelling Implementation*" (tüm alanlar) ve "Barriers*" (tüm alanlar) veya "Challenge*" (tüm alanlar) ve "Success Factor*" (tüm alanlar) ve "health*" (tüm alanlar) dahil değil "Infrastructure*" (tüm alanlar) anahtar kelimeleri ile,
- WoS kategorileri olarak "Yönetim" veya "İnşaat Mühendisliği" veya "Eğitim Araştırmaları" veya "İnşaat Yapı Teknolojisi" veya "Bilgisayar Bilimleri Bilişim Sistemleri" veya "Elektrik Elektronik Mühendisliği" veya "Kamu Çevre İş Sağlığı" veya "Yeşil Sürdürülebilir Bilim Teknoloji" veya "Çevre Mühendisliği" veya "Üretim Mühendisliği" veya "Mimarlık" veya "Hukuk" kategorilerinde arama yapılmıştır.
- Belge türü "makale" veya "inceleme makalesi" veya "erken erişim makaleleri",
- Zaman aralığı 2000 ila 2023 arası yıllar olarak sınırlandırılmıştır.

Bu kriterlerle yapılan ilk arama sonuçlarında 2796 yayın elde edilmiştir. Türkçe ve İngilizce dışında dil kullanılan 112 yayın kapsam dışı tutulmuştur. İlk eleme kriteri sonrasında 2684 adet yayın için özetler taranmıştır. Konu ile ilişkisi olmayan, direnç ve engelleri içermeyen çalışmalar da hariç edilmiş ve 112 makale detaylı inceleme için seçilmiş ve tam metin okuması yapılmıştır. Tam metin değerlendirmeleri sonucunda ise, AHP yönteminde kullanılacak kriterlerin belirlenmesi amacıyla 31 makale uygun bulunmuştur.

İncelenen makalelerde, BIM'e geçiş süreçlerine ilişkin toplam 32 engel belirlenmiştir. Bu engeller, literatürdeki mevcut sınıflandırmalar ve uzman görüşleri doğrultusunda değerlendirilerek 7 ana kategori altında gruplandırılmıştır. Her bir kategorinin altındaki faktörler kendi içerisinde AHP yöntemi ile göreceli önem derecelerine göre sıralanmıştır.



Şekil 1. Araştırma metodolojisi

AHP yönteminde kullanılan ikili karşılaştırmalı değerlendirmede sorularının uygulanacağı kişi sayısına yönelik herhangi bir hesaplama yöntemi yoktur (Xu vd., 2018). Yapılan literatür araştırmasına göre AHP yönteminde ikili karşılaştırmalı değerlendirmede katılımcı sayısının bir alt limiti veya üst limiti bulunmamaktadır. Bu yöntem için önemli olan tutarlı cevapların elde edilmesidir (Sari vd., 2017; Ansah vd., 2015; Despodov vd., 2011). Bu çalışma kapsamında en doğru sonuçlara ulaşabilmek için BIM ile çalışan mimar, inşaat mühendisi, BIM alanında çalışmaları bulunan akademisyenlerden oluşan on kişiye ikili karşılaştırmalı değerlendirme soruları uygulanmıştır. Katılımcıların eğitim düzeyleri lisans, yüksek lisans ve doktora derecesindedir ve tüm katılımcıların BIM uygulama tecrübesi vardır. BIM deneyim alanı olarak katılımcılar tasarım, çeşitli sayısal analizlerde ve uygulama süreçlerinde BIM kullanan katılımcılardan oluşmaktadır (Çizelge 1).

Uygulanan ikili karşılaştırmalı değerlendirme sonuçlarına göre üç adet tutarlı sonuç tespit edilmiş ve bu üç çalışmanın sonuçlarının ortalamasına göre faktörlerin göreceli önem sıralaması yapılmıştır.

Belirlenen önem sıralamasına göre literatür taraması, araştırmacı görüşleri ve uzman görüşlerine göre çözümüne yönelik bir yol haritası çıkarılmıştır. Kullanılan yol haritasında en önemli faktörün en önce, daha az önemli faktör ise daha sonraki aşamalarda çözülmesine yönelik bir stratejisi izlenerek hazırlanmıştır.

Çizelge 1. Katılımcı özellikleri

Meslek	Mimar (3 Kişi)	İnşaat Mühendisi (2 Kişi)		(Akademisyen) (5 Kişi)
Eğitim Düzeyi	Lisans (1 Kişi)	Yüksek Lisans (5 Kişi)		Doktora (4 Kişi)
BIM Tecrübe yılı	1-5 Yıl (7 Kişi)	5-10 Yıl (3 Kişi)		
BIM Tecrübe Alanı	Tasarım (4 Kişi)	Analiz (3 Kişi)	Uygulama (3 Kişi)	

Uygulanan ikili karşılaştırmalı değerlendirme sonuçlarına göre üç adet tutarlı sonuç tespit edilmiş ve bu üç çalışmanın sonuçlarının ortalamasına göre faktörlerin göreceli önem sıralaması yapılmıştır. Belirlenen önem sıralamasına göre literatür taraması, araştırmacı görüşleri ve uzman görüşlerine göre çözümüne yönelik bir yol haritası çıkarılmıştır. Kullanılan yol haritasında en önemli faktörün en önce, daha az önemli faktör ise daha sonraki aşamalarda çözülmesine yönelik bir stratejisi izlenerek hazırlanmıştır.

2.1 BIM'e geçiş dirençlerinin belirlenmesi

Yapılan sistematik literatür taraması sonucunda 32 faktör belirlenmiştir. AHP yöntemiyle göreceli önem sıralaması yapılırken, benzer özelliklere sahip faktörlerin gruplandırılması ve bu gruplar içindeki faktörlerin kendi aralarındaki önem sıralarının belirlenmesi, analiz sürecinin doğruluğu ve tutarlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Bu sebeple çalışmada literatürde yapılan sınıflandırmalar ve uzman görüşleri temel alınarak belirlenen 32 faktör 7 ana başlık altında gruplandırılmıştır. Bu faktörler Çizelge 2'de gösterildiği gibi "A: Alt yapı ve teknolojik bariyerler" (Van Roy ve Firdevs, 2020; Saka ve Chan, 2020; Hyarat vd., 2022; Waqar vd., 2023), "B: Kültür ve eğitim ile ilişkili bariyerler" (Van Roy ve Firdevs; Olanrewaju vd., 2022; Gharaibeh vd., 2022; Kineber vd., 2023) , "C: Standartlar ve hukuki bariyerler" (Ma vd., 2022; Saka ve Chan, 2020; Zhou vd., 2019), "D: Süreç ve finansal bariyerler" (Hyarat vd., 2022; Erdik vd., 2020; Tabatabaee vd., 2021), "E: Veri kaybı ve güvenlik bariyerleri" (Waqar vd., 2023; Durdyev vd., 2022; Tabatabaee vd., 2021), "F: Teşvik ve taleplere yönelik bariyerler" (Saka ve Chan, 2020; Erdik vd., 2020; Wu vd., 2021; Nasila ve Cloete, 2018), "G: Değişim isteksizliği bariyerleri" (Gharaibeh vd., 2022; Hyarat vd., 2022; Waqar vd., 2023; Erdik vd., 2020) olmak üzere 7 ana başlıkta toplanmıştır.

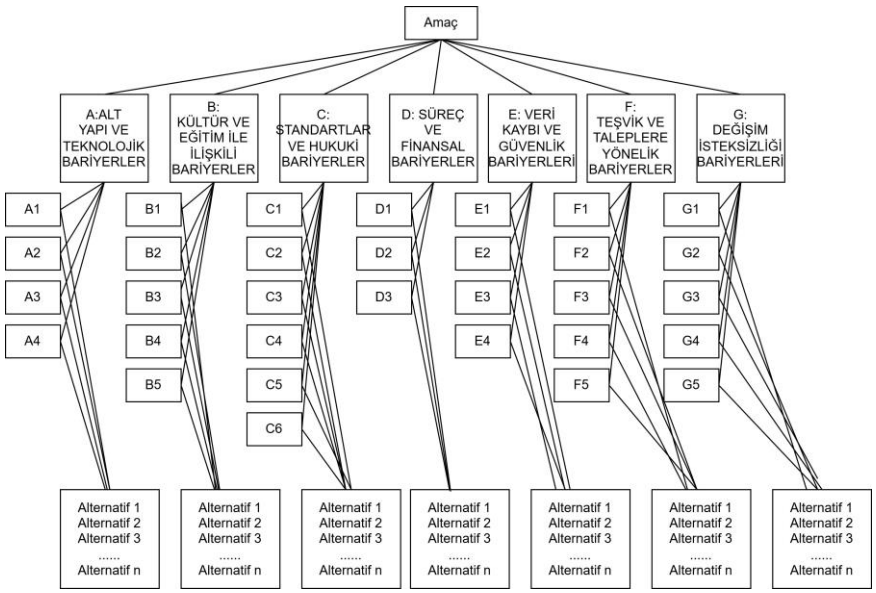
Çizelge 2. BIM'e geçiş sürecinde karşılaşılan dirençler

Ana başlık	Dirençler	Kaynaklar
A: ALT YAPI VE TEKNOLOJİK BARİYERLER	A1: Yetersiz donanım ve alt yapı sorunları	[1], [2],[3], [4], [5], [6], [7]
	A2: Teknik bilgi eksikliği	[1], [4], [7], [9], [10]
	A3: Lisans Sorunu	[6],[11],[13], [14],[15] [16][17]
	A4: Geleneksel süreçlerden BIM süreçlerine geçişteki yazılımsal sorunlar	[8],[9],[10], [15],[19],[20], [21],[22]
B: KÜLTÜR VE EĞİTİM İLE İLİŞKİLİ BARİYERLER	B1: BIM eğitiminin eksik ve yetersiz olduğu düşüncesi	[1], [2],[3], [4],[6], [9], [10], [22],[23],[24]
	B2: BIM uygulamasına yönelik deneyim eksikliği	[1],[3], [5], [8],[9],[10], [15],[22], [25]
	B3: Kültürel değişime karşı direnç	[2],[3],[26],[10],[19],[22],[26]
	B04: Nitelikli eğitmen eksikliği	[4],[11],[8],[15],[19],[21],[22],[28],[29], [30]
	B5: BIM'in kişiler tarafından karmaşık/ zor olarak algılanması	[2],[4],[8],[9],[19],[20],[24],[28],[31]
C: STANDARTLAR VE HUKUKİ BARİYERLER	C1: BIM süreçlerine yönelik sözleşme belirsizliklerinden doğan riskler	[11],[2],[3],[4],[6] ,[9], [10], [12], [15], [19], [20], [21], [22], [31], [33], [34], [35]
	C2: Hükümet düzenleme, standartları ve BIM yönetmeliğinin eksiliği	[2],[3],[4],[8],[9],[10],[15],[19],[20],[33], [35]
	C3: Çizim, modelleme ve kalite kontrol standartları eksikliği	[2],[4],[5],[6],[15],[19],[20],[21],[22], [33],[34],
	C4: BIM veri mülkiyetinin korunmasına yönelik yasal hüküm eksikliği	[1], [9], [15], [11], [20], [22],
	C5: BIM çalışma prosedürlerinin geleneksel prosedürler ile uyumsuzluğu(örgütsel düzenlemeler) ve henüz olgunlaşmamış oluşu	[2],[5],[6],[8],[20],[33],
	C6: BIM için geçerli sigorta hükümlerinin belirsiz oluşu	[1], [8], [10], [15], [19], [20]

Çizelge 2. (devam) BIM'e geçiş sürecinde karşılaşılan dirençler

D: SÜREÇ VE FİNANSAL BARİYERLER	D1: Maliyet sorunları (BIM kullanımına ekstra yatırım)	[1], [5], [7], [8], [28], [11]
	D2: BIM ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu	[7], [11], [15]
	D3: Personel eğitim harcamalarının ek harcama ve zaman kaybı olarak değerlendirilmesi	[11], [8], [27]
E: VERİ KAYBI VE GÜVENLİK BARİYERLERİ	E1: Veri Güvenliği fikir mülkiyeti kaygıları	[8], [10], [11], [12], [15], [19], [20], [22]
	E2: BIM bilgi alışverişindeki kısıtlamaları	[19],[22],[35]
	E3: Mühendislik verilerinin, BIM entegrasyonunda karşılaşabileceği olası sorunlar	[2],[8],[19]
	E4: Dosya aktarımı sırasında veri kaybı korkusu/ riskleri	[8],[10],[12]
F: TEŞVİK VE TALEPLERE YÖNELİK BARİYERLER	F1: Üst yönetim teşvik ve desteği eksikliği	[1], [4], [5], [6], [8], [15], [19], [20], [36]
	F2: Yetersiz dış motivasyon (müşteri talebi olmayışı vb.)	[4], [8], [11], [19], [24], [29]
	F3: Politikacılardan destek eksikliği	[1], [7], [23]
	F4: BIM Avantajlarının somut olarak gözlemlenmemiş olması	[4],[5],[8],[12],[11],[20],[30], [36],[38]
	F5: Birlikte Çalışabilirlik bariyerleri	[2], [4], [5], [7], [8], [19], [38]
G: DEĞİŞİM İSTEKSİZLİĞİ BARİYERLERİ	G1: Düşünme şekli değişmesine yönelik direnç	[6], [12], [19], [21], [38]
	G2: Rekabetçi girişimler ve çalışan direnci	[7], [10], [11], [21]
	G3: Yeni teknolojilere karşı direnç ve ön yargı	[10], [11], [12], [15], [23], [31]
	G4: BIM teknolojisinin yeterince anlaşılmaması	[10], [12], [23], [31], [33]
	G5: Rekabetçi inşaat ortamında bulunmamak, değişime gerek görmemek	[5], [8], [12], [31]

[1]: (Van Roy ve Firdevs, 2020), [2]: (Ma vd., 2022), [3]: (Olanrewaju vd., 2022), [4]: (Saka ve Chan, 2020), [5]: (Olanrewaju vd., 2020), [6]: (Gharaibeh vd., 2022), [7]: (Hyarat vd., 2022), [8]: (Tan vd., 2019), [9]: (Kineber vd., 2023), [10]: (Waqar vd., 2023), [11]: (Erdik vd., 2020), [12]: (Durdyev vd., 2022), [13]: (Alwisy vd., 2019), [14]: (Calitz ve Wium, 2022), [15]: (Tabatabaee vd., 2021), [16]: (Charlson ve Dimka, 2021), [17]: (Bosch-Sijtsema vd., 2017), [18]: (Jin vd., 2019), [19]: (Zhou vd., 2019), [20]: (Charef vd., 2019), [21]: (S. Tan ve Gumusburun Ayalp, 2022), [22]: (Wu vd., 2021), [23]: (Piroozfar vd., 2019), [24]:(Kim vd., 2020) , [25]: (Akal vd., 2022), [26]:(Khurshid vd., 2023), [27]:(Kim vd., 2020), [28]:(Hussain vd., 2022), [29]:(Rokooei, 2015), [30]: (Nguyen ve Nguyen, 2021), [31]:(Stanley ve Thurnell, 2014), [32]:(Chen vd., 2023), [33]:(Mahmoud vd., 2022), [34]: (Azhar, 2011), [35]:(Nasila ve Cloete, 2018), [36]: (Z. Wu vd., 2022), [37]: (Aladag vd., 2016), [38]:(Munianday vd., 2023)



Şekil 2. AHP kriterleri ve Alt kriterlerin Hiyerarşik yapısı

2.2 AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci)

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) çok kriterli bir karar verme sürecidir. Thomas L. Saaty tarafından 1971 yılında geliştirilmiş bir yöntemdir (Wind ve Saaty, 1980). Yüksek paydalara, değişkenlere sahip ve karmaşık karar verme durumlarına çözüm sağlayacak bir yöntemdir (Denizhan ve Yalçıner, 2017). AHP, ikili karşılaştırmalar yaparak hesaplamayı içerir ve öncelik ölçeklerini belirlemek için uzmanların görüşlerini kullanır (Saaty, 1990). Çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde önemli bir yöntem olan AHP, tüm karar alternatiflerini önceliklendirerek birbiriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilir (Altan ve Işık, 2023).

AHP, hedefleri, seçenekleri ve özellikleri ayrıntılı bir hiyerarşik organizasyona bölerek, öncelik (baskınlık) durumlarına göre ikili bir karşılaştırma ölçeği sağlar ve karar vericilerin karmaşık problemleri çözmelerine yardımcı olur (Xu vd., 2018). Şekil 3'de, AHP yönteminde uygulanan ikili karşılaştırmalı değerlendirme sürecine ilişkin bir sorgulama örneği gösterilmektedir.

A: ALT YAPI VE TEKNOLOJİK BARİYERLER

En önemli	9	7	5	3	1	3	5	7	9	En önemli
(A1) YETERSİZ DONANIM VE ALT YAPI SORUNLARI	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	(A02) Teknik bilgi eksikliği
(A1) YETERSİZ DONANIM VE ALT YAPI SORUNLARI	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	(A03) Lisans Sorunu
(A1) YETERSİZ DONANIM VE ALT YAPI SORUNLARI	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	(A04) Geleneksel süreçlerden BIM süreçlerine geçişteki yazılımsal sorunlar
(A02) Teknik bilgi eksikliği	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	(A03) Lisans Sorunu
(A02) Teknik bilgi eksikliği	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	(A04) Geleneksel süreçlerden BIM süreçlerine geçişteki
(A03) Lisans Sorunu	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	(A04) Geleneksel süreçlerden BIM süreçlerine geçişteki

Şekil 3. İkili karşılaştırmalı değerlendirmede soruları örneği

Hazırlanan ikili karşılaştırmalı değerlendirmede soruları Çizelge 3'de verilen rakamlar ile hiyerarşik yapısı oluşturulur. Buna göre katılımcıya ikili karşılaştırma yapılacak parametrenin diğer parametreye üstünlüğü 1, 3, 5, 7 ve 9 sayılar olarak değer alır. Bu değerlerden 1 eşit öneme sahip olduğunu 9 ise son derece önemli olduğunu yansıtır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Önem derecelendirmesi

Standart Tercih Tablosu	
Önem Değerleri	Değer Tanımları
1	Eşit Önemde
3	Biraz Daha Önemli (Az Üstünlük)
5	Oldukça Önemli (Fazla Üstünlük)
7	Çok Önemli (Çok Üztünlük)
9	Son Derece Önemli (Kesin Üstünlük)
2,4,6,8	Ara Değer (Uzlaşma Değeri)

AHP hesaplamaları sırasında kriterler ve alt kriterler belirlenir ardından göreceli önem derecelerinin belirlenmesi için 1 numaralı denklemde gösterilen (nxn) karşılaştırma matrisi oluşturulur (Saaty, 1990: 12).

$$\begin{bmatrix} * & 1.\text{kriter} & 2.\text{kriter} & \dots & n.kriter \\ 1.kriter & 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ 2.\text{kriter} & w_2/w_1 & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ \text{n.kriter} & w_n/w_1 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasından sonraki adım özvektörün hesaplanmasıdır. (Supçiller ve Çapraz, 2011; Vural vd., 2020). Matrisin nxn boyutunda özvektörü 2. denklemde belirlenmektedir:

i=1,2,3,…,n ve j=1,2,3,…,n olmak üzere;

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=0}^{n} a_{ij}} \qquad w_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} b_{ij}}{n} \quad (2)$$

Kriterlerin yüzde önem dağılımların W = [wi]nx1 şeklindeki sütün vektörlerinin hesaplanması ile oluşturulur. W sütün vektörü, 2 numaralı denklemde belirtilen bij değerlerinin meydana getirdiği matrisin satır elemanlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilir.

Son olarak her ikili karşılaştırma matrisi için tutarlılık oranı (CR) hesaplanır ve bu oran için üst limitin 0,10 olması istenir. Bu oranın 0,10'un üstünde olması, karar vericinin cevaplarında tutarsızlık olduğunu gösterir ve çalışmaya dahil edilmez. Tutarlılık oranına ulaşmak için öncelikle A matrisinin en büyük özvektörünü (λmax) hesaplamak gerekmektedir (Denklem 3).

i=1,2,3,…,n ve j=1,2,3,…,n olmak üzere,

$D = [a_{ij}]_{n\times n} \times [w_i]_{n\times 1} = [d_i]_{n\times 1}$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=0}^{n} \frac{d_i}{w_i}}{\text{n}} \quad (3)$$

Tutarlılık oranının hesaplanmasında Çizelge 4'de gösterilen rassallık endeksi (RI) kullanılmaktadır. RI sabit sayılardan meydana gelen ve n'e göre sabit değerler alır. Bu bilgiler doğrultusunda CR değerinin hesaplanması 4 numaralı denklemde verilmiştir.

$$\text{CR} = \frac{\lambda - \text{n}}{(\text{n}-1)\times RI} \quad (4)$$

Çizelge 4. Rassallık Endeksi Verileri

n	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45

Belirtilen denklemler kullanılarak on katılımcının cevaplarına ait tutarlılık indeksleri hesaplanmış ve Çizelge 5'te gösterildiği üzere, 7 ana başlık altında gruplandırılan ikili karşılaştırmalı değerlendirme sonuçlarının üç katılımcı için tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Katılımcı Tutarlılık değerleri

Katılımcı	Parametre	Tutarlılık değeri (CR)
1.Katılımcı	A	0,0681
	B	0,0916
	C	0,0787
	D	0,0121
	E	0,0289
	F	0,0916
	G	0,0916
2. Katılımcı	A	0,0578
	B	0,0421
	C	0,0727
	D	0,0281
	E	0,0773
	F	0,0895
	G	0,0919
3. katılımcı	A	0,0606
	B	0,0421
	C	0,0656
	D	0,0784
	E	0,0719
	F	0,0622
	G	0,0826

3. Bulgular

3.1. *AHP sonuçlarına göre faktörlerin sıralaması*

AHP yöntemi ile her bir engelin katılımcılar üzerindeki etkisi ve algısı dikkate alınmıştır. Verilen yanıtlar, her engelin sektördeki BIM uygulamalarını ne ölçüde etkilediğini anlamak için analiz edilmiştir. Bu analiz, birden fazla katılımcının görüşlerini ve sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır. Engellerin sıralanması, karar vericilere hangi sorunların öncelikli olarak ele alınması gerektiği konusunda yön göstermektedir. Göreceli önem derecelerinin belirlenmesi, BIM'in benimsenmesini olumsuz etkileyen faktörlerin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu bulgular, sektördeki paydaşların hangi alanlara yatırım yapmaları gerektiğini belirlemelerine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, eğitim, teşvik ve destek mekanizmalarının hangi konularda güçlendirilmesi gerektiğine dair önemli bilgiler sunar. Her engelin ortalama göreceli önem derecesi, sektördeki mevcut durum ve gelecekteki gelişmelerle bağlantılı olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, katılımcıların perspektifleri, engellerin çözümüne yönelik stratejilerin oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ortalamalar üzerinden yapılan sıralama, en acil çözüm gerektiren sorunların önceliklendirilmesine olanak tanır.

BIM e geçiş süreçlerinde karşılaşılan engellerin göreceli önem derecelerinin hesaplanmasında kullanılan AHP analiz sonuçlarına göre (Çizelge 6);

-"A: Altyapı ve Teknolojik bariyerler" ana başlığı için en önemli faktör olarak önem ortalaması 0,341 olan ''A2: Teknik bilgi Eksikliği'' maddesi, en az önemli faktör ise önem ortalaması 0,173 olarak hesaplanan "A1: Yetersiz donanım ve alt yapı sorunları" olduğu,

-"B: Kültür ve eğitim ile ilişkili bariyerler" ana başlığı için en önemli faktör olarak göreceli önem derecesi ortalaması 0,309 olan ortalama ile ''B3: Kültürel değişime karşı direnç'' maddesi, en az önemli faktör ise önem ortalaması 0,071 olarak hesaplanan "B04: Nitelikli eğitmen eksikliği" olduğu,

- "C: Standartlar ve hukuki bariyerler" ana başlığı için en önemli engel önem ortalaması 0,283 olan ''C2: Hükümet Düzenlemeleri, Standartlar ve BIM Yönetmeliğinin Eksikliği'' maddesi, en az önemli faktör önem ortalaması 0,098 olarak hesaplanan "C6: BIM için geçerli sigorta hükümlerinin belirsiz oluşu" maddesi olduğu,

- "D: Süreç ve finansal bariyerler" ana başlığı için en önemli engel, önem ortalaması 0,609 olarak hesaplanan ''D1: BIM Kullanımına Ekstra Yatırım Maliyetleri'' maddesi, en az önemli faktörün önem ortalaması 0,148 olan "D3: Personel eğitim harcamalarının ek harcama ve zaman kaybı olarak değerlendirilmesi" maddesi olduğu,

- "E: Veri kaybı ve güvenlik bariyerleri" ana başlığı için en önemli engel, önem ortalaması 0,488 olarak hesaplanan ''E3: Mühendislik Verilerinin, BIM Entegrasyonunda Karşılaşabileceği Olası Sorunlar'', en az önemli faktörün ise 0,058 ortalama ile "E1: Veri Güvenliği fikir mülkiyeti kaygıları" maddesi olduğu,

- "F: Teşvik ve taleplere yönelik bariyerler" ana başlığı için en önemli engel olarak, önem ortalaması 0,226 olarak hesaplanan ''F4: BIM Avantajlarının Somut Olarak Gözlemlenmemiş Olması'' maddesi, en az önemli faktörün ise 0,178 ortalama ile "F5: Birlikte Çalışabilirlik bariyerleri" maddesi olduğu,

- "G: Eğişim isteksizliği bariyerleri" ana başlığı için en önemli engel olarak, önem 0,265 ''G3: Yeni Teknolojilere Karşı Direnç ve Önyargı'' maddesi en az önemli faktörün ise 0,073 ortalama ile "G2: Rekabetçi girişimler ve çalışan direnci" olduğu bulgusuna varılmıştır.

3.2 *Yol Haritası*

İnşaat sektöründe projelerin daha verimli, sürdürülebilir ve koordineli bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyan BIM teknolojisi, küresel ölçekte giderek artan bir öneme sahip olmasına rağmen, Türkiye'de sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Bu sınırlı kullanımın temelinde, teknik bilgi eksikliği, maliyet sorunları, lisans problemleri, kültürel direnç ve politik destek eksikliği gibi çeşitli yapısal ve organizasyonel engeller yatmaktadır. Bu engellerin aşılabilmesi için sistematik bir planlama gereklidir. Türkiye'de BIM kullanımının yaygınlaşmasının önündeki engellerin tespit edilmesi ve bu engellerin aşılmasına

yönelik stratejik bir yol haritası oluşturulması bakımından öncelikle yol haritasına yönelik stratejilerinin belirlenmesi gerekir (Anaç vd., 2024).

Çizelge 6. Katılımcıların cevaplarına göre faktörlerin göreceli önem dereceleri

Faktörler		1.Katılıncı (λmax)	2.Katılıncı (λmax)	3.Katılıncı (λmax)	(λmax) Ortalama	Göreceli Önem derecesi
A	A1	0,083	0,291	0,145	0,173	**4**
	A2	0,593	0,384	0,048	0,341	**1**
	A3	0,044	0,097	0,431	0,190	**3**
	A4	0,280	0,228	0,377	0,295	**2**
B	B1	0,253	0,243	0,253	0,249	**2**
	B2	0,122	0,276	0,122	0,173	**3**
	B3	0,535	0,039	0,535	0,309	**1**
	B4	0,032	0,151	0,032	0,071	**5**
	B5	0,057	0,292	0,057	0,135	**4**
C	C1	0,046	0,223	0,214	0,161	**3**
	C2	0,426	0,198	0,227	0,283	**1**
	C3	0,087	0,156	0,158	0,133	**4**
	C4	0,150	0,131	0,109	0,13	**5**
	C5	0,266	0,156	0,158	0,193	**2**
	C6	0,025	0,136	0,134	0,098	**6**
D	D1	0,487	0,655	0,685	0,609	**1**
	D2	0,435	0,158	0,136	0,243	**2**
	D3	0,078	0,187	0,179	0,148	**3**
E	E1	0,051	0,066	0,059	0,058	**4**
	E2	0,256	0,124	0,118	0,166	**3**
	E3	0,576	0,449	0,440	0,448	**1**
	E4	0,117	0,361	0,383	0,287	**2**
F	F1	0,253	0,145	0,138	0,178	**5**
	F2	0,122	0,229	0,225	0,192	**4**
	F3	0,535	0,050	0,038	0,207	**2**
	F4	0,032	0,327	0,319	0,226	**1**
	F5	0,057	0,249	0,280	0,195	**3**
G	G1	0,253	0,161	0,165	0,193	**4**
	G2	0,122	0,047	0,051	0,073	**5**
	G3	0,535	0,122	0,139	0,265	**1**
	G4	0,032	0,313	0,311	0,218	**3**
	G5	0,057	0,357	0,335	0,249	**2**

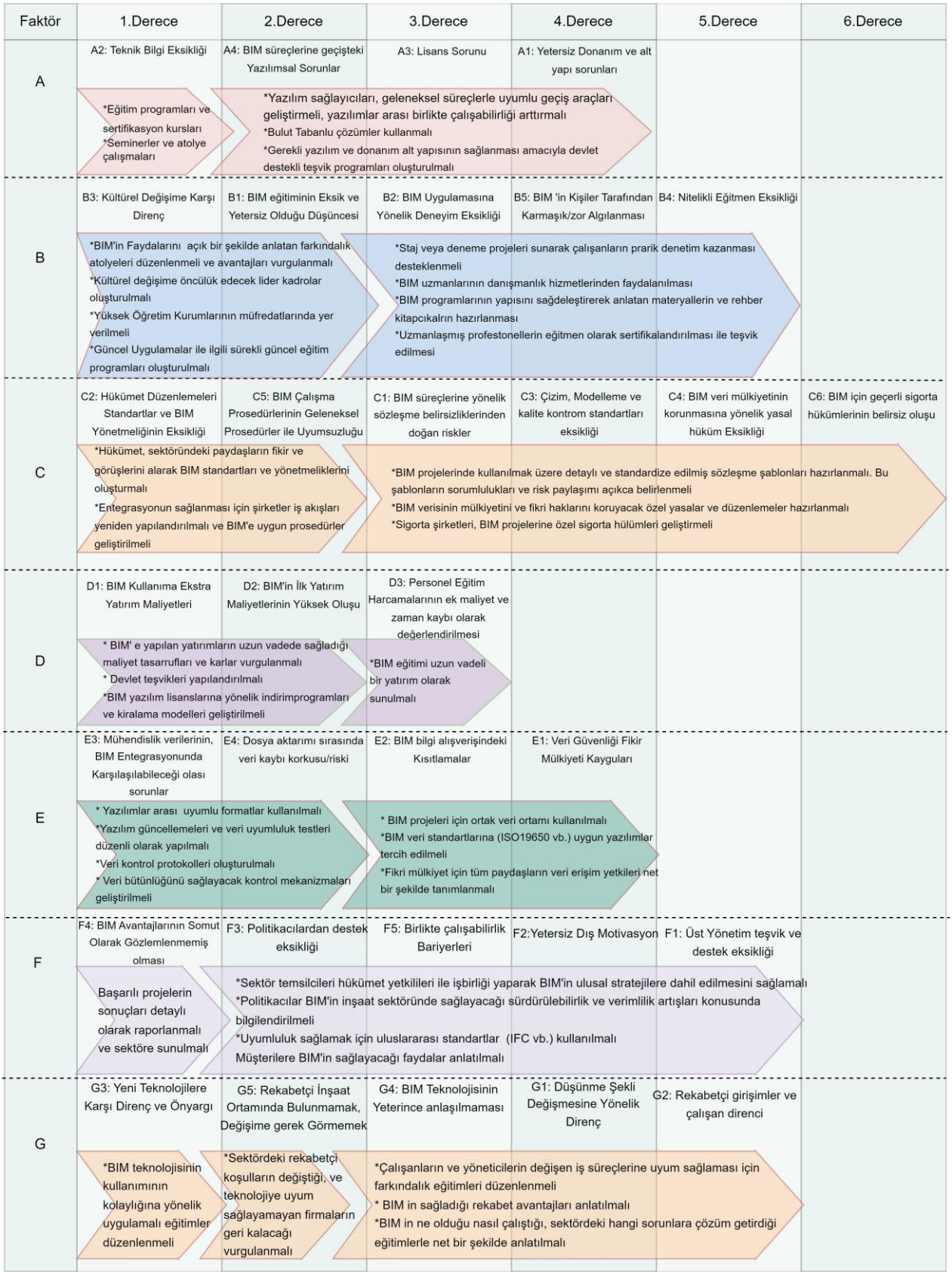
Çalışma kapsamında belirlenen strateji alanında uzmanların öncelik sıralamasına göre çözüm geliştirmesine dayanır. Buna göre uzmanlar tarafından en fazla önemli görülen engel ilk olarak çözülebileceği daha az önemli görülen problemlerin ise daha sonraki aşamalarda çözülmesi şeklinde oluşturulmuştur.

AHP yönteminin kullanıldığı bu çalışmada, her bir grup altında yer alan faktörler kendi içerisinde karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, ana parametreler için oluşturulan matrislerin boyutları şu şekildedir: A ana parametresi için 4x4, B için 5x5, C için 6x6, D için 3x3, E için 4x4, F için 5x5 ve G için 5x5. Şekil 4'te sunulan yol haritasına uygun olarak, AHP sonuçları dikkate alınmış ve çözüm önerileri en fazla 6 derecede değerlendirilmiştir. Çözüm önerilerinden bazıları yalnızca tek bir faktöre yönelikken, bazıları birden fazla faktörü kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu öneriler, literatür taramaları, uzman görüşleri ve araştırmacının elde ettiği bulguların bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi sonucunda oluşturulmuştur.

Tüm bunlar göz önüne alındığında "A: Altyapı ve teknolojik bariyerler" ana başlığı altında uzmanlar tarafından en önemli Bulunan "A2: Teknik bilgi eksikliği'' faktörü için "eğitim programları ve sertifikasyon kurslarının düzenlenmesi" ve "seminer ve atölye çalışmalarının düzenlenmesi" gibi bir öneri sunulmuştur. Diğer tüm alt başlıklar için ise "yazılım sağlayıcıları, geleneksel süreçlerle uyumlu geçiş araçları geliştirmeli, yazılımlar arası birlikte çalışabilirliği arttırmalı", "bulut tabanlı çözümlerin kullanılması" ve "gerekli yazılım ve donanım altyapının sağlanması amacıyla devlet destekli teşvik programları oluşturulması" önerilmiştir.

"B: kültür ve eğitim ile ilişkili bariyerler" ana başlığı altında uzmanlar tarafından en önemli bulunan "B3: kültürel değişime karşı direnç" ve ikinci derecede öneme sahip "B1: BIM eğitiminin eksik ve yetersi olduğu düşüncesi" parametrelerinin çözümüne yönelik "BIM avantajlarının açıklanmasına yönelik atölyelerin düzenlenmesi", "kültürel değişime öncülük edecek liderlerin belirlenmesi", "yükseköğretim kurumlarının müfredatlarına BIM derslerinin eklenmesi" ve son olarak "sürekli güncel eğitimi programlarının oluşturulması" önerilmiştir. Diğer tüm parametrelerin çözümüne yönelik ise "staj veya deneme projeleri ile pratik deneyim kazanılmasının desteklenmesi", "BIM uzmanlarından danışmanlık hizmeti alınması", "BIM yapısını sadeleştirerek anlatan materyallerin oluşturulması" ve "sertifikasyonlar ile teşviklerin yapılması" önerilmiştir.

"C: standartlar ve hukuki bariyerler" başlığı altında en önemli faktör olarak tespit edilen "C2: hükümet düzenlemeleri, standartlar ve BIM yönetmeliğinin eksikliği" ve ikinci derecede öneme sahip "C5: BIM çalışma prosedürlerinin geleneksel prosedürler ile uyumsuzluğu" parametreleri için "hükümet ve sektördeki paydaşlar işbirliği ile BIM standartları ve yönetmeliklerini oluşturulması" ve "BIM entegrasyonunun sağlanması için şirketlerin iş akışlarının yeniden yapılandırılması ve BIM prosedürlerinin geliştirilmesi" önerilmiştir. Bu ana başlık altındaki diğer tüm parametreler için "BIM projelerinde kullanılmak üzere detaylı ve standardize edilmiş sözleşme şablonlarının hazırlanması", "BIM verilerinin mülkiyetini ve fikri haklarının korunmasına yönelik özel yasaların düzenlenmesi" ve "BIM projelerine özel sigorta hükümlerinin geliştirilmesi" önerilmektedir.



Şekil 4. BIM geçiş sürecindeki engellerin çözümüne yönelik yol Haritası

"D: süreç ve finansal bariyerler" ana başlığı altında bulunan "D1: BIM kullanımına ekstra yatırım maliyetleri" ve ardından "D2: BIM' in İlk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu" parametreleri önemli parametreler olduğu için ilk olarak bunların çözülmesi önerilmiştir. Bu parametrelerin çözümü için "BIM' e yapılan yatırımların uzun vadede sağladığı maliyet tasarrufları ve karların vurgulanması", "devlet teşviklerinin yapılandırılması" ve son olarak "BIM yazılım lisanslarına yönelik indirim programları ve kiralama modellerinin geliştirilmesi" önerilmiştir. "D3:

Personel Eğitim harcamalarının ek maliyet ve zaman kaybı olarak değerlendirilmesi" parametresine karşı ise "BIM eğitimi uzun vadeli bir yatırım olarak sunulması" önerisi sunulmuştur.

"E: veri kaybı ve güvenlik bariyerleri" başlığı altında en önemli faktör olarak tespit edilen "E3: mühendislik verilerinin, BIM entegrasyonunda karşılaşılabileceği olası sorunlar" ve ardından önemli olarak tespit edilen "E4: Dosya aktarımı sırasında veri kaybı korkusu/riski" parametrelerinin çözümüne yönelik öneriler; "yazılımlar arası uygun formatların kullanılması", "yazılım güncellemeleri ve "veri uyumluluk testlerinin düzenli olarak yapılması", "veri kontrol protokollerinin geliştirilmesi", ve "veri bütünlüğünü sağlayacak kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi" olarak sıralanabilir. Diğer tüm parametreler için "BIM projeleri için ortak veri ortamının kullanılması", "ISO 19650 vb. BIM veri standartlarının kullanılması" ve "fikri mülkiyetler için tüm paydaşların veri erişimlerinin net bir şekilde tanımlanması" önerilmiştir.

"F: Teşvik ve taleplere yönelik bariyerler" ana başlığı altında en önemli faktör olarak tespit edilen "F4: BIM avantajlarının Somut olarak gözlemlenmemiş olması" parametresi için "BIM ile tamamlanan başarılı projelerin detaylı olarak raporlanması ve sektöre sunulması önerilmiştir". Diğer tüm parametrelerin çözümüne yönelik "Sektör temsilcileri ve hükümet yetkililerinin iş birliği ile BIM ulusal stratejilerinin geliştirilmesi", "paydaşlar arası uyumluluk sağlanması için uluslararası IFC gibi standartların kullanılması" ve "müşterilere BIM' in sağlayacağı faydaların anlatılması" önerilmiştir.

"G: Değişim isteksizliği bariyerleri" ana başlığı altında en önemli faktör olarak tespit edilen "G3: yeni teknolojilere karşı direnç ve önyargı" parametresinin çözümüne yönelik "BIM teknolojisinin kullanımının kolaylığına yönelik uygulamalı eğitimlerin" düzenlenmesi önerilmiştir. Ardından ikinci derecede önemli olan "G5: Rekabetçi inşaat ortamında bulunmamak, değişime gerek görmemek" parametresine yönelik "sektördeki rekabetçi koşulların değiştiği ve teknolojiye uyum sağlayamayan firmaların geri kalacağının vurgulanması" çözüm önerisi sunulmuştur. Geri kalan tüm parametreler için "çalışanların ve yöneticilerin değişen iş süreçlerine uyum sağlaması için farkındalık eğitimlerinin düzenlenmesi", "BIM' in sağladığı rekabet avantajlarının anlatılması", "BIM' in sektörde hangi sorunlara çözüm getirdiği eğitimlerle net bir şekilde anlatılması" gibi öneriler sunulmuştur.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada elde edilen veriler, Türkiye'de BIM kullanımının yaygınlaşmasının önündeki temel engelleri kapsamlı bir şekilde analiz ederek, bu engellerin her biri için katılımcıların verdiği göreceli önem derecelerine dayalı bir sıralama oluşturmuştur. Sonuçlar, BIM'in sektörde tam anlamıyla benimsenmesini zorlaştıran en büyük engellerin başında teknik bilgi eksikliği, altyapı ve donanım yetersizliği, yüksek lisans maliyetleri ve hükümet düzenlemelerinin eksikliği gibi faktörlerin yer aldığını göstermektedir. Katılımcıların değerlendirmeleri, bu engellerin sektördeki profesyoneller ve firmalar üzerinde farklı ağırlıklara sahip olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle teknik bilgi eksikliği, BIM süreçlerine hakim olamayan çalışanların verimsiz çalışmasına ve projelerde hataların artmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, firmaların BIM yazılımı için gerekli altyapıya ve donanıma sahip olmaması, bu sürecin verimli bir şekilde uygulanmasını engelleyen önemli bir bariyer olarak öne çıkmaktadır. Jang ve Collinge'nin yapmış olduğu çalışmada gelişmiş yazılım birlikte çalışabilirliğine ve daha iyi bilgi alışverişi protokollerine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Çalışma sonuçları bu çalışmayı destekler niteliktedir. Bununla birlikte, programların lisans maliyetleri de özellikle küçük ve orta ölçekli firmalar için BIM'e geçişin önündeki finansal bir engel oluşturmaktadır (Jang ve Collinge, 2020). Firmalar, bu maliyetleri karşılamakta zorluk çekerken, yatırım yapma konusunda tereddüt yaşamaktadır. Üst yönetimin BIM'e olan ilgisinin düşük olması, projelerde BIM teknolojisinin kullanılmasını desteklemeyen bir diğer önemli faktördür. Yönetim kademesinde BIM'in uzun vadeli faydalarının yeterince anlaşılmaması, bu teknolojiye yatırım yapma kararlarını olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak, BIM'in sektörde yaygınlaşmasını sağlamak için altyapı yatırımlarının artırılması, personel eğitimlerinin yaygınlaştırılması ve finansal teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. BIM'in sektörde yaygınlaşması için ayrıca hükümet düzenlemeleri ve standartlar konusunda ciddi adımlar atılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular, BIM ile ilgili yeterli yasal düzenleme ve standartların olmayışının, sektörde bu teknolojinin benimsenmesini engelleyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar Kisel ve Mishlanova (2022) çalışması ile örtüşmektedir. Hükümet tarafından belirlenmiş standartların olmaması, projelerde uyumsuzluklara ve BIM'in uygulanabilirliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, ulusal ve uluslararası standartlar belirlenmeli ve BIM'in zorunlu kılındığı projelerde bu standartlar dikkate alınmalıdır. Ayrıca, katılımcıların verdiği cevaplar doğrultusunda BIM kullanımının önündeki kültürel ve kurumsal dirençlerin de

dikkate alınması gerektiği görülmüştür. Yeni teknolojilere karşı olan önyargılar, BIM'in avantajlarının yeterince anlaşılmamasına ve bu teknolojinin sektörde yaygın bir şekilde benimsenmemesine neden olmaktadır. Özellikle geleneksel yöntemlere bağlılık, BIM süreçlerine geçişte önemli bir engel teşkil etmektedir. BIM'in sağladığı verimlilik, maliyet tasarrufu ve kalite artışı gibi faydaların sektörde daha iyi tanıtılması, bu direncin aşılmasına katkı sağlayabilir. Sonuç olarak, BIM'in Türkiye'de daha geniş bir alanda kullanılabilmesi için hem eğitim düzeyinin artırılması hem de hükümet tarafından bu teknolojinin kullanımını teşvik eden düzenlemelerin hayata geçirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, sektördeki tüm paydaşların iş birliği yaparak BIM'e yönelik stratejik adımlar atması, Türkiye'nin inşaat sektöründe dijital dönüşüm sürecini hızlandıracaktır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye'de BIM teknolojisinin kullanımının yaygınlaşmasının önündeki engeller kapsamlı bir şekilde analiz edilerek, bu engellerin aşılması için stratejik bir yol haritası sunulmuştur. Araştırma bulguları, Türkiye'de BIM kullanımını sınırlayan başlıca engellerin teknik bilgi eksikliği, altyapı yetersizliği, maliyet yüksekliği, kültürel direnç ve hukuki düzenlemelerin eksikliği gibi faktörlerden kaynaklandığını ortaya koymuştur.

Teknik bilgi eksikliği, çalışanların BIM süreçlerine hakim olmamalarına ve projelerde verimsizliklere yol açmasına neden olmaktadır. Ayrıca, BIM yazılımlarına ve bu yazılımların etkili kullanımı için gerekli altyapıya sahip olmamak da önemli bir engel olarak öne çıkmaktadır. Kültürel direnç ve geleneksel yöntemlere bağlılık, BIM'in sektörde geniş bir kabul görmesini engellemektedir. Bu bağlamda, BIM'in avantajlarının sektörde daha etkin bir şekilde tanıtılması, bu dirençlerin aşılmasında kritik rol oynamaktadır.

Araştırma sonuçları, hükümetin BIM kullanımını destekleyen yasal düzenlemeler yapması ve sektöre yönelik teşvik programları geliştirmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu tür düzenlemeler, BIM'in yaygınlaştırılmasına katkı sağlarken, sektördeki paydaşların da bu dönüşümü daha kolay benimsemelerini sağlayacaktır. Ayrıca, BIM eğitimlerinin yaygınlaştırılması, sektördeki profesyonellerin teknolojiye daha kolay adapte olmalarını sağlayacak ve bu süreçteki verimlilik artışı gözlemlenecektir.

Çalışma, BIM'in başarılı bir şekilde Türkiye inşaat sektöründe uygulanabilmesi için gerekli olan stratejilerin belirlenmesi açısından önemli bir rehber sunmaktadır. Bu stratejilerin uygulanması, sektördeki dijital dönüşümü hızlandıracak, verimliliği artıracak ve maliyetleri düşürecektir. BIM'in tam anlamıyla uygulanabilmesi için tüm paydaşların işbirliği yaparak teknolojiyi benimsemeleri ve gerekli altyapıyı sağlamaları kritik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak, Türkiye'de BIM kullanımının yaygınlaşması, sektördeki dijital dönüşümü tetikleyerek, uluslararası standartlarla uyumlu projelerin hayata geçirilmesine olanak tanıyacaktır. Bu doğrultuda, ilgili paydaşlar tarafından eğitim, altyapı yatırımları ve yasal düzenlemeler gibi stratejik adımlar atılmalı, sektördeki dirençler aşılmalıdır. BIM'in etkin kullanımı, inşaat sektöründe sürdürülebilir büyüme ve gelişme için önemli bir araç olacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu çalışma Dr. Öğr. Üyesi Merve ANAÇ danışmanlığında tamamlanmış olan 'Türkiye'de BIM kullanımının yaygınlaşmasının önündeki engellerin tespiti, önem derecesi ve yol haritası önerisi" başlıklı Yüksek Lisans (Tez no: 911210) tezinden türetilmiştir.

Bu çalışma, Hasan Kalyoncu Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu tarafından onaylanmıştır (onay numarası: 57871).

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Yazma, Görselleştirme, Analiz

Yazar 2: Araştırma, Metodoloji, Yazma, Görselleştirme, Analiz, Doğrulama

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

6. Kaynaklar

Akal, A. Y., Kineber, A. F., ve Mohandes, S. R., 2022. A Phase-Based Roadmap for Proliferating BIM within the Construction Sector Using DEMATEL Technique: Perspectives from Egyptian Practitioners. *Buildings*, **12(11)**, 1805. https://doi.org/10.3390/buildings12111805

Aladag, H., Demirdögen, G., ve Isik, Z., 2016. Building Information Modeling (BIM) Use in Turkish Construction Industry. *Procedia Engineering*, **161**, 174-179. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.08.520

Altan, E., ve Işık, Z., 2024. Digital twins in lean construction: a neutrosophic AHP–BOCR analysis approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **31(12)**, 5029-5056.

Alwisy, A., Hamdan, S., Barkokebas, B., Bouferguene, A., ve Al-Hussein, M., 2019. A BIM-Based Automation of Design and Drafting for Manufacturing of Wood

Panels for Modular Residential Buildings. *International Journal of Construction Management*, **19(3)**, 187-205. https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1411458

Anaç, M., Gumusburun Ayalp, G., ve Karabeyeser Bakan, M., 2024. A Roadmap for Reducing Construction Waste for Developing Countries. *Sustainability,* **16(12)**, 5057. https://doi.org/10.3390/su16125057

Ansah, R. H., Sorooshian, S., ve Bin Mustafa, S., 2015. Analytic hierarchy process decision making algorithm. *Global journal of pure and applied mathematics,* **11(4)**, 2403-2410.

Arayici, Y., Coates, P., Koskela, L., Kagioglou, M., Usher, C., ve O'Reilly, K., 2011. BIM Adoption and Implementation for Architectural Practices. *Structural Survey,* **29(1)**, 7-25. https://doi.org/10.1108/02630801111118377

Ariono, B., Wasesa, M., ve Dhewanto, W., 2022. The Drivers, Barriers, and Enablers of Building Information Modeling (BIM) Innovation in Developing Countries: Insights from Systematic Literature Review and Comparative Analysis. *Buildings,* **12(11)**, 1912. https://doi.org/10.3390/buildings12111912

Azhar, S., 2011. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges. for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering,* **11(3)**, 241-252. https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127

Barqawi, M., Chong, H. Y., ve Lopez, R., 2023. Effects of Critical Success Factors, BIM Implementation Strategies, and Barriers on Employer-Initiated Delays. *International Journal of Construction Management,* **23(16)**, 2788-2803. https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2097041

Bosch-Sijtsema, P., Isaksson, A., Lennartsson, M., ve Linderoth, H. C. J., 2017. Barriers. and facilitators for BIM use among Swedish medium-sized contractors - "We wait until someone tells us to use it". *Visualization in Engineering,* **5(1)**, 1-12. https://doi.org/10.1186/S40327-017-0040-7

Calitz, S., ve Wium, J. A., 2022. A Proposal to Facilitate BIM Implementation Across the South African Construction Industry. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering,* **64(4)**, 1-9. https://doi.org/10.17159/2309-8775/2022/v64n4a3

Charef, R., Emmitt, S., Alaka, H., ve Fouchal, F., 2019. Building Information Modelling Adoption in the European Union: An Overview. *Journal of Building Engineering,* **25**. 100777. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100777

Charlson, J., ve Dimka, N., 2021. Design, Manufacture and Construct Procurement Model for Volumetric Offsite Manufacturing in the UK Housing Sector. *Construction Innovation,* **21(4)**, 800-817. https://doi.org/10.1108/CI-10-2019-0108/FULL/XML

Chen, Y., Cai, X., Li, J., Lin, P., Song, H., Liu, G., Cao, D., ve Ma, X., 2023. The Values and Barriers of BIM Implementation Combination Evaluation Based on, Stakeholder Theory: a Study in China. *Engineering, Construction and Architectural Management,* **30(7)**, 2814-2836. https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2020-0607

Denizhan, B., ve Yalçıner, A. Y., 2017. Analitik Hiyerarşi Proses ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemleri Kullanılarak Yeşil Tedarikçi Seçimi Uygulaması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi,* **6(1)**, 63-78. https://doi.org/10.17100/NEVBILTEK.288003

Despodov, Z., Mitić, S., & Peltečki, D., 2011. Application of the AHP method for selection of a transportation system in mine planning. *Podzemni radovi,* **19**, 93-99.

Durdyev, S., Ashour, M., Connelly, S., ve Mahdiyar, A., 2022. Barriers to the implementation of Building Information Modelling (BIM) for facility management. *Journal of Building Engineering,* **46**, 103736. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103736

Erdik, M., ve Gökuç, Y. T., 2020. Türk yapı sektöründe yapı bilgi modellemesinin adaptasyonu. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **22(1)**, 159-171.

Gharaibeh, L., Matarneh, S. T., Eriksson, K., ve Lantz, B., 2022. An Empirical Analysis of Barriers to Building Information Modelling (BIM) Implementation in Wood Construction Projects: Evidence from the Swedish Context. *Buildings,* **12(8)**, 1067. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12081067

Hussain, M., Memon, A. H., ve Bachayo, A., 2022. Building Information Modeling in Construction Industry of Pakistan: Merits, Demerits and Barriers. *Journal of Applied Engineering Sciences,* **12(1)**, 43-46. https://doi.org/10.2478/jaes-2022-0007

Hyarat, E., Hyarat, T., ve Al Kuisi, M., 2022. Barriers to the Implementation of Building Information Modeling among Jordanian AEC Companies. *Buildings,* **12(2)**, 150-150. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020150

Jang, R., ve Collinge, W., 2020. Improving BIM Asset and Facilities Management Processes: A Mechanical and Electrical (M&E) Contractor Perspective. *Journal of Building Engineering,* **32**, 101540.

Khurshid, K., Danish, A., Salim, M. U., Bayram, M., Ozbakkaloglu, T., ve Mosaberpanah, M. A., 2023. An In-Depth Survey Demystifying the Internet of Things (IoT). in the Construction Industry: Unfolding New Dimensions. *Sustainability,* **15(2)**, 1275. https://doi.org/10.3390/su15021275

Kim, K. P., Freda, R., ve Nguyen, T. H. D., 2020. Building Information Modelling Feasibility Study for Building Surveying. *Sustainability*, **12(11)**, 4791. https://doi.org/10.3390/su12114791

Kineber, A. F., Massoud, M. M., Hamed, M. M., Alhammadi, Y., ve Al-Mhdawi, M. K. S., 2023. Impact of Overcoming BIM Implementation Barriers on Sustainable Building Project Success: A PLS-SEM Approach. *Buildings*, **13(1)**, 178. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13010178

Mahmoud, B. Ben, Lehoux, N., Blanchet, P., ve Cloutier, C., 2022. Barriers, Strategies, and Best Practices for BIM Adoption in Quebec Prefabrication Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs). *Buildings*, **12(4)**,390. https://doi.org/10.3390/buildings12040390

Ma, X., Darko, A., Chan, A. P. C., Wang, R., ve Zhang, B., 2022. An Empirical Analysis of Barriers. to Building Information Modelling (BIM) Implementation in Construction Projects: Evidence from the Chinese context. *International Journal of Construction Management*, **22(16)**, 3119-3127. https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1842961

Munianday, P., A. Rahman, R., ve Esa, M., 2023. Case Study on Barriers to Building Information Modelling Implementation in Malaysia. *Journal of Facilities Management*, **21(4)**, 511-534. https://doi.org/10.1108/JFM-10-2021-0132

Kisel, T., ve Mishlanova, M. 2022. Research of the Problems of BIM Technologies Implementation in the Investment-and-Construction Projects of the Russian Companies. In E3S Web of Conferences,Vol. 363, 02044, EDP Sciences.

Namlı, E., Işıkdağ, Ü., ve Kocakaya, M. N., 2019. Building Information Management (BIM), A New Approach to Project Management. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, **4(1)**, 323-332. https://doi.org/10.29187/jscmt.2019.36

Nasila, M., ve Cloete, C., 2018. Adoption of Building Information Modelling in the Construction Industry in Kenya. *Acta Structilia*, **25(2)**, 1-38. https://doi.org/10.18820/24150487/as25i2.1

Nguyen, T.Q., ve Nguyen, D.P., 2021. Barriers in BIM Adoption and the Legal Considerations in Vietnam. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, **12(1)**, 283-295. https://doi.org/10.30880/ijscet.2021.12.01.027

Olanrewaju, O. I., Chileshe, N., Babarinde, S. A., ve Sandanayake, M., 2020. Investigating. the Barriers to Building Information Modeling (BIM) Implementation within the Nigerian Construction Industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **27(10)**, 2931-2958. https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2020-0042

Piroozfar, P., Farr, E. R. P., Zadeh, A. H. M., Timoteo Inacio, S., Kilgallon, S., ve Jin, R., 2019. Facilitating Building Information Modelling (BIM) using Integrated Project Delivery (IPD): A UK perspective. *Journal of Building Engineering*, **26**, 100907. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100907

Rokooei, S., 2015. Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **210**, 87-95. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.332

Saaty, T. L., 1990. An Exposition of the AHP in Reply to the Paper "Remarks on the Analytic Hierarchy Process". *Management Science*, **36(3)**, 259-268. https://doi.org/10.1287/mnsc.36.3.259

Saka, A. B., ve Chan, D. W. M., 2020. Profound Barriers to Building Information Modelling (BIM) Adoption in Construction Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): An Interpretive Structural Modelling Approach. *Construction Innovation*, **20(2)**, 261-284. https://doi.org/10.1108/CI-09-2019-0087

Sari, R. E., Meizar, A., Tanjung, D. H., ve Nugroho, A. Y., 2017. Decision making with AHP for selection of employee. In 2017 5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM) 1-5. IEEE.

Stanley, R., ve Thurnell, D. P., 2014. The Benefits and Barriers to, Implementation of 5D BIM for Quantity Surveying in New Zealand. *Construction Economics and Building*, **14(1)**, 105-117. https://doi.org/10.5130/AJCEB.v14i1.3786

Supçiller, A. A., ve Çapraz, O., 2011. AHP-TOPSIS Yöntemlerine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması. *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, **13,** 1-22.

Tabatabaee, S., Mahdiyar, A., ve Ismail, S., 2021. Towards the success of Building Information Modelling implementation: A Fuzzy-Based MCDM Risk Assessment Tool. *Journal of Building Engineering*, **43**, 103117. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103117

Tan, S., ve Gumusburun Ayalp, G., 2022. Root Factors Limiting BIM Implementation in Developing Countries: Sampling the Turkish AEC Industry. *Open House International*, **47(4)**, 732-762. https://doi.org/10.1108/OHI-12-2021-0273

Tan, T., Chen, K., Xue, F., ve Lu, W., 2019. Barriers to Building Information Modeling (BIM) Implementation in China's Prefabricated Construction: An Interpretive Structural Modeling (ISM) Approach. *Journal of Cleaner Production,* **219**, 949-959. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.141

Van Roy, A. F., ve Firdaus, A., 2020. Building Information Modelling in Indonesia: Knowledge, Implementation

and Barriers. J*ournal of Construction in Developing Countries*, **25 (2)**, 199-217.

Vural, D., Köse, E., ve Bayam, B., 2020. AHP ve VIKOR yöntemleri ile personel seçimi. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi*, **10(21)**, 70-89.

Waqar, A., Qureshi, A. H., ve Alaloul, W. S., 2023. Barriers to Building Information Modeling (BIM) Deployment in Small Construction Projects: Malaysian Construction Industry. *Sustainability*, **15(3)**, 2477. https://doi.org/10.3390/su15032477

Wind Y. ve Satty T., 1980. Marketing Applications of the Analytic Hierarcy Process. *Management Science*, **26(1)**, 641-655.

Wu, Z., Lu, Y., He, Q., Hong, Q., Chen, C., ve Antwi-Afari, M. F., 2022. Investigating the Key Hindering Factors and Mechanism of BIM Applications Based on Social Network Analysis. *Buildings*, **12(8)**, 1270. https://doi.org/10.3390/buildings12081270

Xu, J., Hunter, G. W., Lekki, J. D., Gao, X., Wu, Y., ve Li, Y., 2019. Research on Information Integration of Construction Project Management Based on BIM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **267(3)**, 032069. https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/3/032069

Xu, X., Liu, J., Xu, N., Wang, W., ve Yang, H., 2018. Quantitative Study on the Evolution Trend and Driving Factors of Typical Rural Spatial Morphology in Southern Jiangsu Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, **10(7)**, 2392. https://doi.org/10.3390/su10072392

Yang, M., Ge, C., Zhao, X., ve Kou, H., 2023. FSPLO: A Fast Sensor Placement Location Optimization Method for Cloud-Aided Inspection of Smart Buildings. *Journal of Cloud Computing*, **12(1)**, 31. https://doi.org/10.1186/S13677-023-00410-0

Zhou, Y., Yang, Y., ve Yang, J.B., 2019. Barriers to BIM Implementation Strategies in China. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **26(3)**, 554-574. https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2018-0158

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1587364
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045603 (878-902)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045603 (878-902)

İnşaat Projelerinde Süre Uzatımının Hukuki ve Mühendislik Açılardan İncelenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 18.11.2024
Kabul/Accepted: 05.03.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Examination of Time Extension in Construction Projects from Legal and Engineering Perspectives

Ahmet MERTER[1*], Gülçağ ALBAYRAK[2]

[1] *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye*
[2] *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

İnşaat sözleşmelerinde genel itibariyle, yüklenicinin taahhüt ettiği edimi yerine getirmesi için bir süre belirlenmektedir. Belirlenen inşaat süresi uzadıkça, işin tamamlanamama ihtimali de artmaktadır. Ülkemizde de inşaat projelerinin sıklıkla vadesinde bitmediği, bu durumda yüklenicilerin cezalı şekilde çalıştığı ya da sözleşmenin feshi ile karşı karşıya kalındığı bilinmektedir. En sıradan bakım-onarım işlerinden, daha karmaşık ve uzmanlık gerektiren hastane, okul, altyapı işlerine kadar her türden projenin teslim süresi hususunda yüklenici firma ile sorunlar yaşanabilmektedir. Bu noktada gecikmeye neden olan etkenlerin ortaya konulması önem kazanmaktadır. Çünkü bu şekilde yüklenici temerrüde düşebileceği gibi işin bitirilmesi için süre uzatımı hakkı da kazanabilmektedir. Süre uzatımına ilişkin talepler çoğu zaman taraflar arasında anlaşmazlıklar yaratmakta, bu durum hukuki süreçlerin uzamasına ve projenin aksamasına neden olmaktadır. Bu çalışmada özel sektörde 6098 Sayılı Türk Borçlar Kanunu hükümlerine tabi şekilde imzalanan inşaat sözleşmelerinde süre uzatımı kavramı ele alınmaktadır. Bu amaçla, ilgili mevzuatlar incelenmiş, sözleşme taraflarının sorumlulukları ve süre uzatımının koşulları ile hesabına yönelik hem hukuki hem de mühendislik çözümlerine yer verilmiştir. Ayrıca inşaat işlerinde uygulanan iş programı ve gecikme analizleri aracılığıyla süre uzatımı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *İnşaat sözleşmesi; Süre uzatımı; Eser hukuku; İş programı; Gecikme analizi*

Abstract

In construction contracts, a specific due date is generally set for the contractor to fulfill the obligations they have committed to. As the construction period extends, the likelihood of the project not being completed increases. It is well-known that in our country, construction projects frequently fail to be completed on time, which often results in contractors working under penalties or facing contract termination. The problems can arise regarding the completion time of all types of projects, ranging from the routine maintenance and repair tasks to more complex and specialized projects such as hospitals, schools, and infrastructure works. At this point, it becomes crucial to identify the factors causing the delays since the contractor may fall into default or, alternatively, gain the right of a time extension for completing the work. The requests for time extensions frequently lead to disputes between the parties, prolonging legal processes and causing project delays. In this study, the concept of time extension in construction contracts signed in the private sector under the provisions of the Turkish Code of Obligations No. 6098 is examined. For this purpose, relevant laws have been reviewed, and both legal and engineering solutions are provided concerning the responsibilities of the contracting parties, the conditions for time extension, and how it is calculated. Additionally, time extension is evaluated through project schedules and delay analyses used in construction projects.

Keywords: *Construction contract; Time extension; Construction law; Project schedule; Delay analysis*

1. Giriş

İnşaat sektörü, sürekli değişen dinamikler, teknolojik gelişmeler ve ekonomik dalgalanmalar gibi birçok faktörün etkisi altında, karmaşık süreçler nedeniyle taraflar arasında anlaşmazlıkların sıkça yaşandığı bir alan olmaya devam etmektedir. Ancak hızla gelişen inşaat sektörünün karmaşık yapısı sebebiyle projelerin temel unsurları olan kalite, maliyet ve süre hedeflerinde sapmalarla karşılaşılmaktadır (Çolak ve Uğur, 2023). Bu çalışmada, inşaat projelerinde süre uzatımı kavramı hem hukuki hem de teknik boyutlarıyla ele alınmıştır.

Süre uzatımı, projelerin zamanında tamamlanmasını etkileyen temel unsurlardan biri olarak kabul edilmektedir. Çalışmamızda, Türk Borçlar Kanunu başta olmak üzere ilgili yasal düzenlemeler incelenerek, süre uzatımı talebinin hukuki temelleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Özellikle Türk Borçlar Kanunu (TBK) m.95 ve m.473 gibi maddelerin, tarafların karşılıklı haklarını ve yükümlülüklerini nasıl etkilediği tartışılmıştır. Hukuki perspektiften bakıldığında, süre uzatımı talebinin yalnızca bir ihtimal değil, sözleşmeye dayalı bir hak olarak görülmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ancak bu hak,

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ahmet MERTER e-posta/e-mail: 503320230006@ogrenci.ogu.edu.tr

tarafların sözleşmelerinde açık hükümlerle düzenlenmediğinde, uygulamada farklı yorumlara ve uyuşmazlıklara yol açabilmektedir. Süre uzatımına ilişkin belirsizlikler, projelerin zamanlama, bütçe ve kalite hedeflerini doğrudan etkileyerek sektörde daha büyük sorunlara neden olabilmektedir.

Teknik açıdan bakıldığında, süre uzatımı taleplerinde iş programlarının hazırlanması ve uygulanmasının kritik bir rol oynadığı görülmektedir. İş programları, proje yönetiminin temel taşı olarak, süre uzatımının etkilerinin doğru bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, gecikme analizleri ve mühendislik tekniklerinin, taraflar arasında yaşanabilecek uyuşmazlıkları önlemede önemli bir katkı sağladığı ortaya konulmuştur. Özellikle büyük ölçekli projelerde, iş programlarının hukuki bağlayıcılığının yanı sıra, teknik geçerliliği de büyük önem taşımaktadır. Mühendislik perspektifi, iş programlarının planlama aşamasında daha fazla dikkate alınarak sürecin etkin yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Proje zamanlamasının doğru yapılması, maliyet ve kalite unsurlarının da başarıyla yönetilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca bu çalışmada, süre uzatımı taleplerinin yalnızca hukuki bir mesele olarak değil, aynı zamanda bir proje yönetimi sorunu olarak ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle literatürde vurgulanan gecikme analizi gibi mühendislik tekniklerinin, inşaat projelerindeki uyuşmazlıkları önlemede ve yönetmede daha geniş bir rol oynaması gerektiği ifade edilmektedir. Bu bağlamda hem hukuki hem de teknik uzmanlıkların proje yönetimine entegre edilmesinin kaçınılmaz olduğu belirtilmektedir.

Bu çerçevede, süre uzatımına ilişkin hukuki ve teknik boyutların detaylı bir şekilde ele alınması, sektörün genel başarısını artırmak adına büyük önem taşımaktadır. Gelecekte, daha kapsamlı analizler ve uygulama rehberleri hazırlanarak, bu alandaki boşlukların doldurulması hedeflenmelidir. Bu çalışmalar, inşaat projelerinin tüm paydaşlar için daha sürdürülebilir ve başarılı bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunacaktır.

2. Literatür Taraması

Süre uzatımı, inşaat projelerindeki en kritik konulardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu durum, projenin zamanında tamamlanmasını etkileyen hukuki, teknik ve finansal sorunları içermektedir. Etkili bir süreç yönetimi, sözleşme tarafları arasındaki uyuşmazlıkları azaltabilir ve projelerin başarıyla tamamlanmasına katkı sağlayabilir. Literatür, genellikle hukuki çerçeve ve uygulamadaki teknik zorluklara odaklanırken, mühendislik perspektiflerini entegre eden çalışmaların daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, süre uzatım taleplerine neden olan faktörlerin nesnel ve öznel unsurlarına odaklanmıştır. Nesnel faktörler arasında doğal afetler, beklenmedik olaylar ve zemin koşullarındaki olumsuz değişiklikler yer alırken, öznel faktörler yüklenicinin yetersiz planlama, finansal sorunlar ve insan kaynakları eksiklikleri gibi durumları içermektedir. Durdyev ve Hosseini (2020), gecikme nedenlerini kapsamlı bir şekilde analiz ederek sektör profesyonellerine çözüm önerileri sunmuş; Fashina ve arkadaşları (2021) ise hakediş gecikmeleri ve proje maliyetlerindeki değişimlere dikkat çekmiştir. Elhusseiny ve arkadaşları (2021) parametrik modellerle gecikmelerin maliyet etkilerini inceleyerek farklı bir yaklaşım getirmişlerdir.

Hukuki perspektiften bakıldığında, süre uzatımının genellikle sözleşme şartlarına dayandığı vurgulanmaktadır. Türk Borçlar Kanunu (TBK) m.95 ve m.473, bu konuda yasal temel sağlayan önemli maddeler arasındadır. TBK m.95, karşılıklı anlaşma şartı ile süre uzatımına olanak tanırken, m.473 özellikle eser sözleşmeleri bağlamında yüklenicinin özen borcuna dikkat çekmektedir. Hukuki literatürde, “haklı sebep” kavramı, yüklenicinin kontrolü dışındaki durumlarda borçlu temerrüdünü önlemek için kullanılmaktadır. Bunun yanında, uluslararası standartların önde gelen örneği olan FIDIC sözleşme şartları, bu tür uyuşmazlıkların çözülmesinde çerçeve sağlamaktadır.

Türkiye'de kamu projelerinde süre uzatımı talepleri için 4735 Sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanunu önemli bir dayanak oluşturmaktadır. Bu kanun, sözleşmelerin tarafları arasındaki hak ve yükümlülükleri belirlerken, mücbir sebepler ve olağanüstü durumlar nedeniyle ortaya çıkan gecikmelerde süre uzatımının şartlarını ve prosedürlerini detaylı olarak düzenler. Örneğin, doğal afetler gibi mücbir sebeplerden kaynaklanan gecikmelerde yüklenicinin gecikme cezalarından muaf tutulması mümkündür. Bu yönüyle kanun hem işveren hem de yüklenici tarafında adil bir denge sağlamayı hedefler. Kanunun bu yönelimi, tarafların uyuşmazlıklarını azaltarak projelerin başarıyla tamamlanmasını destekler.

Yargıtay kararları da incelendiğinde süre bakımından vadesinde teslim edilmeyen inşaat sözleşmelerinde inşaat mühendisi bilirkişisini hedef göstermiş ve teknik olarak analiz edilmeden verilecek kararların uygun olmayacağını bu çalışmanın belli bölümlerinde paylaşılan emsal kararlarda da görülmektedir.

Mühendislik açısından ele alındığında, gecikme analizleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu analizler genellikle kritik yol

metotları ve proje yönetim yazılımları (örneğin, MS Project, Primavera) yardımıyla yapılmaktadır. Aravindhan ve arkadaşları (2023), kritik yol üzerindeki gecikmeleri değerlendirerek, şantiye kayıtlarından elde edilen verilere dayalı çözümler sunmuş; Çevikbaş ve Işık (2021) ise gecikme analizi yaklaşımlarını inceleyerek bu alanda önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar, yalnızca mühendislik metotları değil, aynı zamanda şantiye yönetimi süreçlerine dair iyileştirmeler de içermektedir.

Adhikaril ve arkadaşları (2006) ve Arditi ve Pattanakitchchamroon (2006), gecikme analizi için gerekli saha kayıtlarının varlığının, zamanın ve maliyetinin önemini vurgulamıştır. Braimah ve Ndekugri (2007), gecikme analizi için uygun programların olması gerektiğini, ana iş programının olmasını ve gecikme analizi yönteminin kapasitesinin gecikmelerin çözümlenmesi konusunda ayrıca çalışmalar yapmıştır. Perera ve arkadaşları (2016), eş zamanlı gecikmelerin tespit edilmesini, gecikme analizinin projenin hangi aşamasında yapılması gerektiğini projenin karakteristiği konularında çalışmalar yapmış ve yayınlamıştır. Bu çalışmalar kapsamında kendi has her bir inşaat projesinin gecikme analizi için kriterlerine göre gecikme analizi türü seçmesi gerektiği bu tür çalışmalardan gözükmektedir.

Süre uzatımı konusundaki çalışmalar, hukuki ve mühendislik perspektiflerini birleştirerek kapsamı daha geniş bir yaklaşım sunabilir. Bu sayede, gecikmelerin sadece hukuki çözüm yollarıyla değil, aynı zamanda teknik analizlerle desteklenmesi mümkün olur. Gelecekteki çalışmalar, teknik verilerin daha etkin kullanılmasını sağlayarak projelerdeki uyuşmazlıkları en aza indirebilir. Bu bağlamda süre uzatımı analizleri hem hukuki temellerle hem de mühendislik uygulamalarıyla entegre bir şekilde ele alınmalıdır.

3. İnşaat Projelerinde Süre Uzatımının Hukuki Açıdan İncelenmesi

Süre uzatımı, teslim vadesinden önce iş sahibinin risk alanında gerçekleşen ve yüklenicinin işi hızlandırma yükümlülüğünü doğurmayan bir sebep nedeniyle işin, bu teslim vadesinde teslim edilme imkânı zamansal olarak ortadan kalktığı veya tüm tahminlere göre ortadan kalkmasının mümkün görüldüğü ihtimalde sözleşme süresinin ilgili sebebin gecikme etkisini ortadan kaldıracak şekilde değiştirilmesi veya değiştirilmesi gerektiği ifade edilmektedir (Bilgetekin 2020).

İnşaat sözleşmelerinin de hukuki olarak dahil olduğu TBK m.470-486 arasındaki eser sözleşmesi kanun maddeleridir. TBK' da süre uzatımı kavramı araştırıldığında en yakın benzerlik gösteren kanun maddesi m.95'tir. Kanun maddesine göre sürenin uzatılmış durumunda aksi kararlaştırılmadıkça önceki sürenin sona ermesini izleyen birinci gündür diyerek sadece sürenin uzatılabileceğini belirtmiş ama hukuki ya da teknik bir şekilde açıklık getirmemiştir.

İnşaat sözleşmelerinde taraflar eğer süre uzatımı konusunda sözleşmelerine açıkça ilgili maddeler yazdılarsa süre uzatımı kavramının o sözleşmede hukuki bir temeli bulunduğunu söylenebilir. Ancak, sözleşmede süre uzatımına dair hiçbir madde yer almadığında veya öngörülmediğinde, Türk Borçlar Kanunu'na başvurulması gerektiği anlaşılmaktadır. TBK'da süre uzatımı ile ilgili detaylı bir düzenleme bulunmamaktadır. Sözleşme serbestisi ile inşaat sözleşmelerinde taraflar işin bitiş ve sonrasında teslim vadesi gibi tarihleri veya süreleri değiştirebilme imkanlarına sahiptir. Ancak genel kural olarak, tarafların sözleşme süresini tek taraflı olarak değiştirmeleri mümkün değildir (Ayan 2008). TBK m.95'in lafzına göre bunu karşılıklı bir şekilde anlaşma yaparak yapılabileceği görülmektedir.

3.1. Süre Yönetiminde Yüklenicinin Basiretli Hareket Etme Yükümlülüğü

Eser sözleşmelerinde, yüklenicinin edimlerini özenle yerine getirmesi gerektiği, TBK' nun 471. maddesinde açıkça ifade edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan sözleşmelerde taraflar arasındaki güven ilişkisi, yüklenicinin özen borcu olarak karşımıza çıkmaktadır (Eren 2017). Yüklenicinin yerine getirmesi gereken özen seviyesi ise, aynı sektörde faaliyet gösteren, işinde dikkatli ve bilgili bir yüklenicinin mesleki standartlarına göre değerlendirilir. Bu durum, genellikle "objektif özen yükümlülüğü" olarak adlandırılır ve yüklenicinin taahhüt ettiği sonucu elde etme sorumluluğu ile doğrudan bağlantılıdır (Gümüş 2014).

Yüklenici, iş sahibiyle sözleşme görüşmelerinden başlayarak hem işin gerekliliklerini hem de çevresel ve teknik koşulları dikkate alarak hareket etmek zorundadır. İş süresi planlanırken, yalnızca yapılacak işin süresi değil, aynı zamanda beklenmedik durumlar nedeniyle oluşabilecek gecikmeler de hesaba katılmalıdır. Örneğin, zemin özellikleri nedeniyle zorlayıcı olabilecek bir bölgede ya da toplumsal hareketlilik riski yüksek bir alanda bu tür faktörlerin göz önüne alınmaması, yüklenicinin gerekli özeni göstermediği şeklinde yorumlanabilir (Kurt 2012).

Bunun yanı sıra, yüklenicinin sahip olduğu teknik ekipman, iş gücü ve seçilen çalışma yöntemleri, sürenin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Örneğin, kazı işlemleri için manuel yöntemlerin mi yoksa gelişmiş makinelerin mi kullanılacağı süre hesaplamasını etkiler. Yüklenici, mevcut koşulları dikkatle analiz ederek, gerçekçi bir süre belirlemelidir. Süreyi iş sahibi belirlese

bile, yüklenicinin bu süreyi yetersiz bulması, sorumluluktan kaçınmasına olanak tanımaz; gecikme riski yüklenicinin üzerinde kalmaya devam eder.

Bilimsel görüşler, basit inşaat işlerinde süre belirlemenin daha kolay olduğunu, ancak karmaşık projelerde matematiksel analiz ve teknik kuralların dikkate alınmasının zorunlu olduğunu vurgular. Yüklenicinin teknik standartlara uymaması, ortaya çıkabilecek olumsuz sonuçların sorumluluğunu taşımasına neden olur. Özellikle büyük çaplı projelerde, detaylı iş programları hazırlanması yaygın bir uygulamadır ve bu programlar, iş sürecinin planlanması ve kontrol edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

3.2. Hukuki Perspektiften İş Programlarının Geçerliliği ve Bağlayıcılığı

İş programları, inşaat projelerinde hangi işlerin ne zaman tamamlanacağını düzenleyen bir zamanlama planı olarak işlev görmektedir. Bu bağlamda, iş programlarında belirtilen tarihler yüklenici için bağlayıcı mıdır? Bu sorunun yanıtı, özellikle Türk Borçlar Kanunu'nun 473. maddesi çerçevesinde, iş sahibinin sözleşmeden dönme hakkını kullanması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Türk ve İsviçre hukuklarında genel kabul gören görüş, iş programlarının bağlayıcı bir niteliğe sahip olmadığı ve yalnızca bir zamanlama öngörüsü olarak değerlendirilmesi gerektiği yönündedir (Gauch 1999). Bu durumun temel gerekçesi, iş programlarının öncelikli amacının, projenin planlı ve etkin bir şekilde yürütülmesini sağlamak olmasıdır. Yüklenici, sahip olduğu mesleki bilgi ve deneyim sayesinde, işlerin organizasyonu ve gerçekleştirilmesi için en uygun yöntemi belirleyebilecek yetkinliğe sahiptir. Nitekim, eser sözleşmesini hizmet sözleşmesinden ayıran en belirgin özelliklerden biri de yüklenicinin organizasyon serbestisine sahip olmasıdır. Bu serbesti, yalnızca işin başlangıç aşamasında değil, inşaat sürecinde ortaya çıkan beklenmedik durumlara uyum sağlanmasını da kapsar.

Eğer taraflar, iş programını sözleşmenin bir parçası haline getirmişlerse veya programdaki tarihlere sözleşmede açıkça atıfta bulunmuşlarsa, programın bağlayıcılığı gündeme gelebilir. Doktrinde bu tür durumlarda iş programının bağlayıcı hale gelebileceğini savunan görüşler bulunmaktadır (Ayan 2008). Ancak, sözleşmeye iş programının dahil edilmesi, kural olarak, programdaki tarihlerin kesin bağlayıcılığını garanti etmez. İş programlarının esas amacı, sürecin planlanması ve gerektiğinde verimlilik adına değiştirilebilmesi olduğundan, bağlayıcı kabul edilmesi sözleşmenin dinamik yapısına ters düşebilir.

İnşaat projeleri, doğası gereği değişkenlik gösterir ve beklenmedik durumlarla karşılaşılabilir. Örneğin, zeminde öngörülmeyen bir sorun ortaya çıktığında, yüklenicinin iş programını bu koşullara uygun şekilde revize etmesi gerekecektir. Bu tür durumlarda, iş sahibinin çıkarları da göz önüne alındığında, programın esnek bir yapıya sahip olması hem tarafların yararına hem de projenin başarıyla tamamlanması açısından önemlidir. Bununla birlikte, iş sahibinin esas beklentisi, eserin sözleşmede belirlenen teslim tarihinde tamamlanmasıdır. Yüklenici, iş programında meydana gelen olası gecikmeleri telafi edecek önlemler almakla yükümlüdür. Dolayısıyla, iş programının yalnızca sözleşmeye dahil edilmiş olması, yüklenicinin organizasyonel özgürlüğünü ortadan kaldırmamalıdır.

Bununla birlikte, sözleşmenin yorumlanması neticesinde tarafların, iş programını bağlayıcı hale getirme niyetinin bulunduğu sonucuna varılabilir. Örneğin, iş programındaki bir tarihin ihlal edilmesi durumunda cezai şart uygulanacağı kararlaştırılmışsa veya birden fazla yüklenicinin çalıştığı projelerde işlerin koordinasyonunun sağlanması için bu tarihlerin uyulması zorunlu kılınmışsa, iş programının bağlayıcılığı kabul edilebilir. Bu tür bağlayıcılık durumlarının tespitinde somut olayın özellikleri dikkate alınmalıdır. İş programlarının bağlayıcılığı, hem tarafların iradelerine hem de inşaat projelerinin dinamik yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. İş programlarının, organizasyonel esneklik sağlama amacı taşıdığı unutulmamalıdır. Ancak tarafların açık bir şekilde bu programı bağlayıcı kılma niyetinde oldukları anlaşılırsa, bu durum hukuken dikkate alınmalıdır.

3.3. Türk Hukukunda Süre Uzatımının Yeri ve Değerlendirilmesi

Süre uzatımı, taraflar arasındaki sözleşmede açıkça düzenlenmişse, hukuki temeli sözleşmeye dayanmaktadır. Ancak, taraflar arasında süre uzatımına ilişkin bir düzenleme yer almadığı durumlarda, bu hususun hangi temellere dayandırılacağı tartışmalı hale gelmektedir. Türk Borçlar Kanunu, eser sözleşmeleri bağlamında süre uzatımı konusunu doğrudan ele almamıştır.

Doktrinde hâkim olan görüşe göre, taraflar arasında süre uzatımına dair bir hüküm bulunmasa dahi yüklenici, belirli koşullar altında bu hakkı talep edebilir (Gauch 1999). Yargıtay'ın içtihatları da bu yaklaşımı desteklemekte ve sözleşmesel bir düzenleme olmasa bile yüklenicinin süre uzatımı talebinin kabul edilebileceğini göstermektedir.

Eser sözleşmeleri, özellikle inşaat sözleşmeleri bağlamında değerlendirildiğinde, yüklenicinin temel yükümlülüğünün, işi sözleşmede kararlaştırılan vadede tamamlayarak teslim etmek olduğu görülmektedir. Söz konusu vadeye uyulmaması durumunda, yüklenici borçlu temerrüdüne düşer ve bu durum kural olarak yüklenicinin kusuruna bağlı olmaksızın gerçekleşir. Bu bağlamda, yüklenicinin, eserin sonuç odaklı teslim yükümlülüğünü yerine getirememesi durumunda ortaya çıkan sonuçlara katlanması gerekmektedir (Ayan 2008).

Ancak, her durumda yüklenicinin gecikmenin sonuçlarına katlanmasının adil sonuçlar doğurmayacağı durumlar mevcuttur. Bu nedenle, yüklenicinin haklarını koruyacak istisnalar oluşturulması gerekliliği gündeme gelmektedir. Hukuki öngörülebilirliği sağlamak amacıyla, bu istisnaların genel bir çerçeveye oturtulması önem taşımaktadır.

3.3.1. Süre Uzatımı ve Haklı Sebep Kavramı Arasındaki İlişki

Haklı sebep kavramı, yüklenicinin gecikmeden kaynaklanan sonuçlara katlanmaması gereken durumları açıklamak için kullanılmaktadır. Doktrinde yaygın kabul gören bu görüşe göre, yüklenicinin haklı bir sebebe dayanması durumunda borçlu temerrüdüne düşmeyecektir (Kurt 2012). Bu bağlamda, haklı sebeplerin varlığı, teslim süresinin uzatılmasını gerektirir ve bu durum iş sahibinin menfaatine de uygun bir çözüm sunar.

Haklı sebebe dayalı süre uzatımı, genellikle herhangi bir talep gerekmeksizin kendiliğinden gerçekleşir. Yargıtay kararları da haklı sebebin süre uzatımı için yeterli bir hukuki temel oluşturduğunu vurgulamaktadır (Çoşkun 2017).

Bununla birlikte, bazı Yargıtay kararlarında mücbir sebep ve haklı sebebin süre uzatımına hak tanıyacağı ifade edildiğinden, haklı sebebin genel olarak iş sahibine yüklenen bir durum olarak değerlendirilebileceği de söylenebilir (Bilgetekin 2020).

• Y. 13. HD. E. 2016/16468 K. 2017/5173 T. 27.4.2017 kararına göre; Davacı ile belediye arasındaki kentsel dönüşüm sözleşmesinde işe başlama ve teslim süreleri belirlenmediğinden, mahkeme, uzman bilirkişilerle keşif yaparak inşaatın makul sürede tamamlanma süresini ve ruhsat süreçlerini değerlendirmeli; buna göre davacının talebini inceleyip karar vermelidir.

• YHGK E. 2012/13- 164 K. 2012/219 T. 21.3.2012 kararına göre; Mahkeme, bilirkişiler aracılığıyla keşif yaparak yüklenicinin işe başlama süresini ve bağımsız bölümlerin inşaat ile iskan ruhsatlarının makul sürede tamamlanma sürelerini belirlemeli, emsal inşaatları da dikkate alarak denetime elverişli bir rapor hazırlamalı ve davacının talebini bu doğrultuda değerlendirerek karar vermelidir.

• Y. 13. HD E. 2014/4594 K. 2014/13302 T. 25.4.2014 kararına göre; Sözleşmede daire teslim süresi belirtilmemiş olup, bu süreyi belirleme yetkisi davalıya bırakılmıştır. Ancak davalı, bu yetkisini kullanırken objektif iyi niyet kurallarına uymalı ve yalnızca haklı nedenlere dayalı gecikmeler dışında, eserin niteliği ve büyüklüğüne uygun bir süre içinde inşaatı tamamlamalıdır.

3.3.2. Borçlar Kanunu'nun Genel İlkeleri Çerçevesinde Süre Uzatımı

Bazı doktrin yazarları, süre uzatımını Borçlar Kanunu'nun genel hükümleri çerçevesinde açıklamaktadır. Örneğin, alacaklı temerrüdü ve ödemezlik def'i gibi hukuki kurumlar, süre uzatımı talebine dayanak oluşturabilir. TBK'nın 97, 98, 106 ve 112. maddeleri bu bağlamda öne çıkan hükümler arasında yer almakta olup, bu maddelerin süre uzatımına dair düzenlemeler için hukuki temel oluşturduğu ifade edilmektedir.

3.3.3. TBK m.123, 124 ve 125 Kapsamında Süre Uzatımı

Karşılıklı borç doğuran sözleşmelerde, taraflardan birinin temerrüde düşmesi halinde, diğer taraf borcun ifası için uygun bir süre belirleyebilir ya da hâkimden bu süreyi tayin etmesini talep edebilir (TBK m.123).

Sözleşmeler tarafları bağlayıcı niteliktedir ve imzalanmadan önce dikkatlice incelenmelidir. İşin teslim tarihi sözleşmede açıkça belirtilmişse, proje bu tarihte eksiksiz şekilde tamamlanmalıdır. Bu nedenle, teslim tarihlerinin sözleşmede net bir biçimde yer alması büyük önem taşımaktadır. Projenin sözleşmede belirlenen tarihte tamamlanamaması durumunda, işveren tarafından yükleniciye, borcun ifası için belirli bir süre tanınabilir.

Belirlenen ek süreye rağmen yüklenici, borcunu yerine getiremezse, iş sahibi TBK m.125 uyarınca şu seçimlik hakları kullanabilir. Eğer yüklenici verilen ek süre içerisinde yine de inşaatı bitirme borcunu yerine getiremez ise alacaklı TBK.m.125'e göre seçimlik haklarından birini kullanabilir. Bunlar;

i. Mal sahibi (işveren), her zaman ifayı (işin bitirilmesini) ve gecikme nedeniyle tazminat hakkını isteyebilir.
ii. Mal sahibi (işveren), ayrıca borcun ifasından ve gecikme tazminatı isteme hakkından vazgeçtiğini hemen bildirerek, borcun ifa edilmemesinden doğan zararın giderilmesini isteyebilir veya sözleşmeden dönebilir.
iii. Mal sahibi (işveren), sözleşmeden dönebilir.

İş sahibi, bu hakları kullanırken her birinin farklı hukuki sonuçları olduğunu göz önünde bulundurmalıdır. Bu süreçte, deneyimli bir planlama mühendisi ve hukuki danışman ile iş birliği yapılarak, seçimlik hakların kullanımıyla ilgili olası sonuçlar analiz edilmelidir.

Örnek olarak; İş sahibi, ek süreye rağmen işin tamamlanmaması durumunda sözleşmeden dönme hakkını kullanmış ve gecikme tazminatı talep etmişse, bu durum iş sahibinin talebinin sözleşmeden dönme değil, olumlu zararın giderilmesi amacı taşıdığı şeklinde yorumlanabilir.

Başka bir örnek olarak; İş sahibi, sözleşmeden dönerek gecikme tazminatı talep ettiğinde, bu durum sözleşmenin sona erdirilmesi ile devam etmesi arasında bir çelişki yaratabilir. Bu tür karmaşık durumlarda, iş sahibinin gerçek iradesi ve talebi esas alınarak karar verilmelidir.

Bu açıklamalar ışığında TBK.m.123'e göre süre uzatımı verilmesi hususunda kritik öneme sahip noktalar aşağıdaki gibidir.

• İş sahibinin, geciken projenin belli bir zaman içinde tamamlanmasını istediği anlamına gelir.
• Direnime düşen yüklenicinin projeyi sözleşmeye göre tamamlaması için kendisine tanınan son haktır.
• Hukuki işlem benzeri irade açıklamasıdır (Duman 2024).
• Yazılı veya sözlü şekilde olabilir. Kanıtlanma güçlüğü nedeniyle noter aracılığı ile yapılması tercih edilmelidir.
• Makul bir süre öngörülmelidir.

TBK.m.124'e göre ek süre verilmesini gerektirmeyen durumlar şöyle ifade edilmektedir:

i. Borçlunun içinde bulunduğu durumdan veya tutumundan süre verilmesinin etkisiz olacağı anlaşılıyorsa (inşaatın yer teslimi yapılmasından sonra yüklenicinin çalışmaya başlamaması, yükleniciye ek süre verilse dahi projenin tamamlanamayacak ölçüde geri kalması, iş sahibinin hiçbir haber vermeden inşaat faaliyetini durdurması)
ii. Borçlunun temerrüdü sonucunda borcun ifası alacaklı için yararsız kalmışsa.
iii. Borcun ifasının, belirli bir zaman dilimi içinde veya belirli bir süre zarfında gerçekleşmemesi durumunda, ifanın artık kabul edilmeyeceği sözleşmeden anlaşılıyorsa.

Öncelikle iş sahibi, yükleniciden herhangi bir ihtarda bulunmaksızın inşaatın tamamlanmasını ve projenin teslimini bekleyebilir. Ancak, sözleşmede belirtilen teslim süresi sona erdiğinde, yüklenicinin edimini yerine getirmemiş olması iş sahibinin yükleniciyi temerrüde düşürmemiş olduğu anlamına gelmez. Bu durum, iş sahibinin fiilen bir ek süre veya süre uzatımı tanımış olduğu şeklinde yorumlanamaz.

Bu bağlamda, iş sahibi, teslim süresinin ihlali halinde;

• Gecikme Cezası Talebi: İş sahibi, sözleşmede açıkça kararlaştırılmışsa, gecikme cezasını talep edebilir. Bu ceza, teslim süresine riayet edilmemesinin sonuçlarından biridir ve iş sahibinin zararını tazmin etmeyi amaçlar

• Olumlu Zararın Tazmini: İş sahibi, gecikmeden kaynaklanan olumlu zararını, yani proje teslimindeki gecikmeden doğrudan etkilenen zararlarını yükleniciden talep edebilir.

Bununla birlikte, yüklenici bu taleplerden ancak gecikmenin kendi kontrolü dışında gerçekleştiğini ve bu gecikmeye sebebiyet veren olayların mesuliyetinin kendisine ait olmadığını kanıtlayarak sorumluluktan kurtulabilir. Bu durum, yüklenicinin özen borcunun yerine getirilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Yüklenicinin sorumluluktan kurtulabilmesi için usulüne uygun şantiye kayıtlarının tutulması büyük önem taşır. Şantiye kayıtları, iş programlarının planlama mühendisleri tarafından hazırlanıp taraflarca onaylanmış bir çerçevede ilerlediğini göstermelidir.

• Şantiye Kayıtları: Projenin ilerleyişiyle ilgili günlük, haftalık veya aylık olarak tutulan ve taraflarca imzalanmış kayıtlar, iş sahibinin ve yüklenicinin karşılıklı yükümlülüklerinin yerine getirilip getirilmediğini objektif bir şekilde belgelemelidir.

• Planlama ve Takip: Planlama mühendisleri tarafından hazırlanan iş programları, hem inşaat sürecinin detaylı bir takibini sağlamakta hem de taraflar arasında uyuşmazlık çıkması halinde güçlü bir delil teşkil etmektedir.

Yüklenicinin temerrüdü durumunda iş sahibi, TBK ve ilgili mevzuat çerçevesinde haklarını kullanırken, tüm süreçlerin belgelendirilmesine özen göstermelidir. Sözleşmede gecikme cezaları ve olumlu zarar tazminine ilişkin hükümler yer almalı ve iş sahibinin yükleniciyi temerrüde düşürmek için gerekli ihtarları noter kanalıyla veya diğer ispatlanabilir yollarla yapması gerekmektedir.

Sonuç olarak, yüklenici, temerrüdün mesuliyetini reddetmek için şantiye ve planlama süreçlerindeki özen yükümlülüğünü kanıtlamak zorundadır. Bu nedenle, yüklenicinin proje boyunca şantiye organizasyonuna ve hukuki belge yönetimine azami dikkati göstermesi, uyuşmazlıkların çözümünde kritik bir role sahiptir.

3.3.4. TBK m.97, 98, 106, 112 ve 117 Kapsamında Süre Uzatımı

İnşaat projelerinde hakediş ödemelerinin zamanında yapılması, yüklenicinin iş programını öngörüldüğü şekilde

yürütmesi için kritik bir öneme sahiptir. Hakediş ödemelerinin gecikmesi, yükleniciyi mali açıdan zor durumda bırakarak sözleşme yükümlülüklerini yerine getirememesine neden olabilir. Bu durum, Türk Borçlar Kanunu'nun 97, 98, 106, 112 ve 117. maddeleri kapsamında süre uzatımı talebi ve diğer hukuki hakların gündeme gelmesini sağlar. Bu bağlamda, hakediş ödemelerinin gecikmesi durumunda süre uzatımı taleplerinin dayandığı hukuki çerçeve, TBK'nun ilgili maddeleri ışığında değerlendirilebilir.

TBK m.97'ye göre, borç ilişkisinde borçlunun ifasını yerine getirebilmesi, diğer tarafın da edim yükümlülüklerini eksiksiz şekilde yerine getirmesiyle mümkündür. İnşaat sözleşmelerinde iş sahibinin hakediş ödemelerini yapmaması, yüklenicinin finansal planlarını aksatır ve işin süresinde tamamlanmasını tehlikeye sokar. Bu durumda, yükleniciden iş programına uygun hareket etmesi beklenemez. İş sahibinin ödeme yükümlülüğünü yerine getirmemesi nedeniyle işin aksaması, yükleniciye süre uzatımı talep etme hakkı doğurur.

TBK m.98 ise borcun ifasının engellenmesi durumunda borçlunun durumu derhal alacaklıya bildirmesini öngörmektedir. İnşaat projelerinde yüklenici, hakediş ödemelerinin yapılmadığını iş sahibine bildirdiğinde, süre uzatımı talebinin hukuki temeli oluşturulmuş olur. Bu bildirim yapılmadığı takdirde, yüklenicinin haklı süre uzatımı talebi zayıflayabilir. Bu nedenle, yüklenicinin hakediş ödemelerinin yapılmadığı durumlarda durumu zamanında ve doğru bir şekilde iş sahibine iletmesi gereklidir.

TBK m.106, alacaklı temerrüdü halleri için yükleniciye önemli bir hukuki koruma sağlar. Hakediş ödemelerinin yapılmaması nedeniyle işin ilerlemesi imkânsız hale geldiğinde, iş sahibinin temerrüde düşmesi söz konusu olur. İş sahibi, ödemelerini zamanında yapmayarak iş programının aksamasına neden olduğunda, bu durum yüklenicinin süre uzatımı ve zarar tazmini taleplerini destekler. Özellikle, gecikme işin genel ilerleyişini olumsuz etkiliyorsa, bu etkilerin sorumluluğu iş sahibine ait olacaktır.

TBK m.112, iş sahibinin kusurundan kaynaklanan zararların tazmin edilmesi gerekliliğini düzenler. Hakediş ödemelerinin yapılmaması durumunda, yüklenici projeyi planlandığı şekilde tamamlayamayabilir. Bu gecikmeden kaynaklanan zararların yüklenici üzerinde kalması adil bir yaklaşım olmaz. Bu nedenle, yüklenici hem süre uzatımı hem de gecikme nedeniyle uğradığı zararların tazminini talep edebilir.

TBK m.117 ise temerrüt durumlarının oluşması için alacaklının borçluyu ihtar etmesi gerektiğini düzenler. Hakediş ödemelerinin yapılmadığı durumlarda, yüklenici iş sahibine resmi bir ihtar göndererek temerrüt durumunu başlatmalıdır. Bu ihtar, yüklenicinin süre uzatımı talep etmesinin yanı sıra gecikmeden doğan faiz ve diğer zarar taleplerinin de temelini oluşturur. İhtar yapılmadığı durumlarda, gecikmeye ilişkin zarar talepleri hukuken geçersiz hale gelebilir. Mühendislik ve proje yönetimi açısından bakıldığında, hakediş ödemelerinin düzenli yapılması, projenin iş programına uygun bir şekilde ilerlemesi için elzemdir. İş sahibinin ödeme yükümlülüğünü yerine getirmemesi, yalnızca süre uzatımı taleplerine neden olmakla kalmaz, aynı zamanda projenin genel finansman dengelerini de bozar. İş programında öngörülen hakediş ödemelerinin aksaması, yüklenicinin mali planlamalarını sekteye uğratır ve işin tamamlanmasını tehlikeye sokar. Hakediş ödemelerinin gecikmesi durumunda yüklenicinin süre uzatımı talebi, TBK'nun ilgili maddeleriyle güçlü bir hukuki dayanağa sahiptir. Taraflar arasında ortaya çıkan uyuşmazlıkların çözümünde TBK'nun bu maddeleri rehberlik etmekte ve yüklenicinin haklarını koruma altına almaktadır. Süre uzatımı hakkının etkin bir şekilde kullanılması, yalnızca projelerin sağlıklı bir şekilde tamamlanmasını değil, aynı zamanda taraflar arasında daha adil bir işleyişin sağlanmasını da mümkün kılmaktadır.

3.3.5. Türk Borçlar Kanunu Madde 473/1 ve Süre Uzatımı İlişkisi

İlgili madde, iş sahibinin teslimden önceki dönemde meydana gelen gecikmeler nedeniyle sözleşmeden dönme hakkını düzenlemektedir. Maddenin tersine yorumundan hareketle, iş sahibine atfedilebilecek bir durumun varlığı halinde yüklenicinin borçlu temerrüdüne düşmeyeceği ve bu durumun haklı bir sebep teşkil edeceği sonucuna ulaşılmaktadır (Kurt 2012).

3.3.6. TBK m.480 f.2 ve TBK m.138 Kapsamında Süre Uzatımı

TBK'nın 480. maddesinin ikinci fıkrası ile 138. maddesi, değişen şartlara uyarlanma imkânı sunarak, süre uzatımı talebine hukuki bir temel sağlamaktadır. Her iki hüküm de gerek Türk gerek İsviçre doktrininde süre uzatımı için geçerli hukuki dayanaklar arasında kabul edilmekte ve bu hükümlere dayanılarak sözleşmenin süresinin uzatılması mümkün görülmektedir (Werz 1994).

3.4. Süre Uzatımının Hukuki Temeli

3.4.1. Haklı Sebep İle Süre Uzatımının İncelenmesi

Türk hukuku doktrininde, yüklenicinin inşaat süresinin uzatılması hakkını elde etmesinde temel bir kavram olarak "haklı sebep" ifadesi sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu kavram, genellikle eser sözleşmesinin özel hükümlerine

doğrudan başvurulmadan, yalnızca bu kavram çerçevesinde tartışılmaktadır. İlgili doktrin görüşlerine göre, haklı sebebin varlığı, yüklenicinin temerrüde düşmesini engeller ve buna bağlı olarak inşaat süresi uzatılır. Ancak, ilk aşamada yalnızca "haklı sebep" kavramını dikkate alarak, eser sözleşmesinin hükümlerine başvurmadan inşaat süresinin uzatılmasının mümkün olup olmadığı sorusu ele alınmalıdır.

Süre uzatımının amacı sadece sürenin artırılması değil, aynı zamanda borçlunun temerrüde düşmesinin de engellenmesidir. Bu doğrultuda, değerlendirme yaparken temerrüt kavramının özellikle incelenmesi gerekmektedir. Eser sözleşmelerinde borçlu temerrüdü, özgül olarak düzenlenmemiştir, bu yüzden borçlu temerrüdü ile ilgili genel hükümler devreye girmektedir. Genel hükümlerde "haklı sebep" kavramı mevcut olduğunda, eser sözleşmesinin özel hükümlerine başvurulmadan, bu genel kuralın tüm sözleşme türlerine uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılabilir. Ancak, eğer genel hükümlerde bu kavram yer almıyorsa, eser sözleşmesinin hükümlerine başvurulmadan yalnızca haklı sebep kavramına dayalı bir sonuç çıkarılmamalıdır.

Süre uzatımının hedefi yalnızca sürenin artırılması değil, aynı zamanda borçlunun temerrüde düşmesinin engellenmesidir. Bu nedenle, borçlu temerrüdünün şartları ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. Türk Borçlar Kanunu'nun 117. maddesinin birinci fıkrasına göre, borçlunun temerrüde düşebilmesi için borcun muaccel olması ve alacaklının borçluya ihtar göndermesi yeterlidir. Maddeye ek olarak, ikinci fıkrada ihtara gerek olmayan durumlar da belirtilmiştir. Bu durumda, açıkça haklı bir sebep bulunmamakta ve borçlu temerrüde düşecektir. Bu yüzden, temerrüdü engelleyen bir durum olarak "haklı sebep" şartının varlığı dikkatle değerlendirilmelidir.

Bazı görüşlere göre, borçlu temerrüdünün şartlarından biri, borçlunun borca aykırı davranışının haklı bir sebebe dayanmadığıdır (Tandoğan 2010a). Bu görüşe göre, haklı sebep kavramı kusurdan bağımsız bir durumu ifade etmektedir. Eğer bu görüş benimsenirse, haklı sebep tüm sözleşmeler bakımından temerrüdü engelleyen bir şart olarak kabul edilebilir. Ancak, haklı sebebin hangi durumlarda geçerli olacağı iş sahibinin risk alanı çerçevesinde analiz edilerek sonuca varılmalıdır.

3.4.2. Türk Borçlar Kanunu m.473/1'in Süre Uzatımı Açısından Hukuki Temeli

Borçlu temerrüdü şartlarında, haklı bir sebep bulunmaması durumunda, eser sözleşmesinin hükümleri çerçevesinde bir hukuki temelin bulunması önemli bir gereklilik teşkil etmektedir. Borçlunun "haklı bir sebep olmaksızın" borcunu yerine getirmemesi, eser sözleşmesi hükümlerinin ayrıca ele alınmasına gerek olup olmadığını belirleyecektir. Ancak, bizce yalnızca genel hükümlerle hareket etmek yerine, eser sözleşmesinin özel niteliklerinin dikkate alınması zaruridir. Çünkü, inşaat sözleşmelerinin ani edimli sözleşmeler olmalarına rağmen yoğun bir hazırlık süreci gerektirmesi, özel bir değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır.

Eser sözleşmesinin ani edimli olmasına rağmen, ifa sürecinin uzun bir hazırlık aşamasına yayılması, sözleşmelerin risk dağılımının özel bir şekilde düzenlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu durum, kanun koyucunun eser sözleşmelerine yönelik belirlediği özel hükümleri açıklamaktadır. Bu yüzden, kanun koyucunun eser sözleşmelerine dair düzenlemeleri göz ardı edilerek yapılacak bir değerlendirme eksik olacaktır. Süre uzatımının hukuki temeli olarak TBK m.473 f.1 esas alınarak söz konusu hükmün genel süre uzatımının hukuki temeli olarak kabul edilmesi görüşünü benimsenmesi gerekmektedir.

3.4.3. Süre Uzatımı Açısından Hükmün İncelenmesi

İş sahibinin, yükleniciye projeleri belirlenen sürede teslim etmemesi durumu göz önünde bulundurulduğunda yüklenicinin inşaatı teslim vadesine yetiştiremeyeceği açıkça görülür. Bu durumda, aslında alacaklı temerrüdü söz konusu olacağı için borçlu temerrüdü şartları gerçekleşmeyecektir. Ancak, borçlu temerrüdü şartlarının sağlanmadığı bu durumda, TBK m.473 f.1 ile aynı sonuca ulaşmak mümkün müdür?

Bu örnekte, iş sahibine yüklenebilecek bir durum söz konusu olduğu için, iş sahibinin TBK m.473/1 uyarınca sözleşmeden dönme hakkı bulunmamaktadır. Yükleniciye yüklenebilecek bir neden olmadığı için, hangi doktrin görüşü benimsenirse benimsensin, iş sahibinin iki alternatiften birini seçmesi gerekecektir: ya aynen ifayı bekleyecek, ya da beklemeyi reddedip, yüklenicinin zararını ödeyerek TBK m.484 uyarınca sözleşmeyi feshedecektir. TBK m.473/1 kapsamında, iş sahibinin sözleşmeden dönme hakkı yalnızca teslim vadesi öncesinde geçerlidir. Teslim vadesi geçtikten sonra ise, iş sahibinin sözleşmeden dönme hakkı açıkça düzenlenmemiştir.

TBK m.473 f.1'in eser sözleşmeleri ve inşaat sözleşmeleri bağlamında süre uzatımının hukuki temeli olarak kabul edilebilmesi için aşağıdaki şartların bir arada bulunması gerekmektedir:

• Teslim Vadesinden Önceki Durum: İş sahibinin, teslim vadesinden önce sözleşmeden dönülemeyecek bir durum nedeniyle teslim vadesinden sonra da temerrüde

dayanarak sözleşmeden dönülememesi, iş sahibinin tek seçeneğinin aynen ifa talep etmesi.

• Aynen İfa Talebi: İş sahibinin yalnızca aynen ifa talep etme imkânı bulunması ve TBK m.473 f.1'in şartlarının gerçekleşmesi durumunda, yüklenicinin işi teslim vadesinde tamamlayamayacağının açıkça anlaşılması halinde, yükleniciye aynen ifa için gerekli süre verilmesi.

• Süre Uzatımının Teslim Vadesine Eklemesi: Yükleniciye aynen ifa için tanınan sürenin inşaat süresine eklenmesi ve bu süre zarfında teslim vadesinin uzatılması gerektiği.

3.4.4. TBK m.473/1 Işığında Teslim Vadesi Sonrası Aynen İfa ve Sözleşmeden Dönme Taleplerinin Değerlendirilmesi

TBK m.473 f.1'e göre, işin teslim vadesinde tamamlanamaması durumunda, eğer bu gecikme iş sahibine isnat edilebiliyorsa, iş sahibi teslim tarihinden önce sözleşmeden dönme hakkını kullanamayacaktır. Ancak, teslim vadesinden sonra sözleşmeden dönme hakkının hala geçerli olup olmadığı konusunda, hükümde net bir açıklama bulunmamaktadır. Eğer iş sahibi teslim vadesinde inşaat tamamlanmamışsa, sözleşmeden dönme hakkı olduğunun kabul edilmesi, inşaat süresinin uzatılmasının engellenmesi anlamına gelecektir. Bu durumda, yüklenicinin kusursuz olması halinde dahi borçlu temerrüdü devreye girecek ve iş sahibi, borçlu temerrüdü hükümlerine dayalı olarak aynen ifa veya sözleşmeden dönme taleplerini iletebilecektir.

Ancak, teslim vadesinden önce iş sahibine verilmiş olmayan sözleşmeden dönme hakkının teslim sonrasında da kullanılamayacağını kabul edersek, inşaat süresi uzayabilir. Zira gecikme iş sahibine yüklenebiliyorsa, yüklenicinin kusuru olmadığından borçlu temerrüdüne dayanarak yalnızca aynen ifa talep edilebilecektir. Bu durumda, yalnızca aynen ifa talep edilebileceği için, yükleniciye gereken sürenin verilmesi gerektiği, inşaat süresinin uzatılması gerektiği sonucuna varılacaktır. Bu değerlendirmelere göre, TBK m.473 f.1'in eser sözleşmelerinde süre uzatımının hukuki temeli olarak kabul edilebilmesi için, teslim vadesinden önce kullanılmayan sözleşmeden dönme hakkının teslim sonrasında da kullanılmaması gerektiği sonucuna ulaşılabilir. Eğer iş sahibinin teslim vadesinden önce gecikmeden kaynaklı sözleşmeden dönme hakkı olmadığı, fakat aynı gecikmenin teslim sonrası dönme hakkı vereceği kabul edilirse, bu durumda sözleşmeden dönme hakkı sadece ertelenmiş olur. Ancak, bu noktada kanun koyucunun amacının gerçekten sözleşmeden dönme hakkını ertelemek olup olmadığı tartışmalıdır. Zira iş sahibinin sözleşmeden daha erken dönmesi, yüklenicinin başka projelere başlama şansı sağlayabilir. Ayrıca, TBK m.484 uyarınca iş sahibinin sözleşmeyi tazminatla feshetme hakkı bulunduğundan, iş sahibinin sözleşmeden dönmesi için özel bir gerekçe bulunmamaktadır.

3.4.5. İş Sahibinin Aynen İfa Talebi ve Süre Uzatımı

Sözleşmeden dönme hakkı bulunmayan ve ifadan vazgeçip olumlu zarar talep etme imkânı olmayan iş sahibinin, yükleniciden yalnızca aynen ifa talep etme hakkı vardır. TBK m.484'te belirtilen hükümler saklı kalmak kaydıyla, iş sahibinin bu durumda yalnızca yükleniciden aynen ifa talep etmesi mümkündür. Bu durumda, yüklenicinin, iş sahibinin talebine uygun şekilde aynen ifa gerçekleştirebilmesi için ek süre verilmesi kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelir. Bu ek süre, yüklenicinin ifayı yerine getirebilmesi için gerekli olan makul bir zaman dilimini kapsamalıdır.

3.5. Süre Uzatımının Hukuki Niteliği

3.5.1. Hukuki Nitelik Açısından Süre Uzatımının Amacının İncelenmesi

Süre uzatımının temel amacı, inşaat sözleşmeleri çerçevesinde taraflar arasındaki gecikme riskinin adil bir şekilde paylaştırılmasıdır. Bu durum, özellikle iş sahibinin taşıdığı risklerin bir ölçüde yüklenici tarafından üstlenmesi ile ilgili olarak, her iki tarafın ekonomik çıkarlarının dengelenmesine hizmet eder. Gecikme riskinin, sözleşme serbestisi dahilinde, taraflarca öngörülebilir ve düzenlenebilir olması mümkündür. Ancak, bu konuda sözleşme hükümlerinin bulunmaması halinde, belirli hukuki temellere dayanan bir düzenlemenin devreye girmesi söz konusu olabilecektir. Bu bağlamda, Türk Borçlar Kanunu'nun 473. maddesinin birinci fıkrasına dayanarak, iş sahibinin bazı durumlarda riski üstlenmesi suretiyle inşaat süresinin uzaması sağlanabilir. Süre uzatımının hukuki niteliği, sözleşmesel düzenlemelerle belirlenmiş olabileceği gibi, sözleşme hükümlerinin eksikliği durumunda da hukuki temele dayanarak ortaya çıkabilir.

3.5.2. Sözleşmesel Düzenleme Durumunda Süre Uzatımının Hukuki Niteliği

Taraflar, inşaat süresinin uzamasına ilişkin özel durumları ve uzatma yöntemlerini sözleşme metinlerinde açıkça düzenleyebilirler. Özellikle büyük ölçekli inşaat projelerinde, taraflar arasında karşılıklı yükümlülüklerin detaylı bir şekilde belirlenmesi yaygın bir uygulamadır. Bu düzenlemeler, uyuşmazlıkların önlenmesi amacıyla büyük önem taşır; çünkü bu konular, doktrinde sıkça tartışılan alanlardandır. Sözleşme kapsamında, belirli olayların meydana gelmesi halinde yüklenicinin iş sahibinden süre uzatımı talep edebilmesi hükme bağlanabilir. FIDIC

sözleşme şartları da benzer bir düzenleme öngörür. Bu durumda yüklenici, iş sahibinden veya mühendisten süre uzatımı talep edebilir ve iş sahibi ya da mühendis bu talebi değerlendirerek onay verebilir, reddedebilir veya talepten daha kısa bir süre uzatımı kararlaştırabilir. Sözleşmesel düzenlemeler doğrultusunda süre uzatımı talebi, bir talep hakkı olarak tanımlanabilir.

Sözleşmede "talep" terimi açıkça belirtilmişse, bu talep yüklenicinin, gecikme sebebiyle inşaat süresinin uzatılmasını isteyen bir bildirim yapmasını zorunlu kılar. Yüklenici bu talepte, ne kadar süre uzatımı istediğini belirtmekle yükümlüdür. Böyle bir durumda, yüklenicinin tek taraflı irade beyanı ile sözleşme süresi otomatik olarak uzar ve iş sahibinin onayı gerekmez. Bu özellik, yenilik doğuran bir hak kullanımı anlamına gelmektedir. Yenilik doğuran haklar, sınırlı sayıda olmamakla birlikte sözleşmeyle belirlenmesi mümkün olan haklardır. Ancak, sözleşme metninden tarafların süre uzatımını bir yenilik doğuran hak olarak tanımlamadığı durumlar da göz önünde bulundurularak, her talep durumunun yenilik doğuran hak olarak nitelendirilmesi uygun olmayacaktır. Yargıtay kararları da bu doğrultuda, yüklenicinin süre uzatımı talep etmemesi durumunda inşaat süresinin uzamayacağını belirtmiştir. Ancak bazı özel durumlar, örneğin 1999 depremi, Yargıtay tarafından süre uzatımı hakkı doğuran olaylar olarak kabul edilmiştir.

• Y. 15. HD E. 2007/5385 K. 2007/7545 T. 26.11.2007 kararına göre; “7.08.1999 tarihindeki deprem nedeniyle inşaatın geçici olarak durdurulmuş olması, depremden etkilenmeyen bir durum olmadığından, sözleşmede mücbir sebep hallerinde süre uzatımı sağlanacağı belirtilmişken, deprem nedeniyle ek süre verilmemesi sözleşmeye aykırı bulunmuştur.

3.5.3. Sözleşmesel Düzenleme Olmaması Durumunda Süre Uzatımının Hukuki Niteliği

Eğer sözleşmede herhangi bir düzenleme bulunmazsa bile, gecikme riskinin iş sahibine yüklenmesi durumunda inşaat süresi uzayabilir. Ancak bu tür durumlarda, süre uzatımının hukuki temeli konusunda doktrinde belirli bir görüş birliği bulunmamaktadır. Sözleşmesel düzenlemenin eksikliği, hukuki temele dayalı bir düzenlemenin devreye girmesine olanak tanır.

Süre uzatımının hukuki temeli, genellikle haklı sebep veya TBK m.473 f.1’e dayanmaktadır. Bu hukuki temele göre, süre uzatımının niteliği de değişebilir. Bu noktada, süre uzatımının hukuki temeli, sözleşme boşluğu görüşü veya sözleşme serbestisi doğrultusunda açıklanabilir.

3.5.4. Hukukta Sözleşme Boşluğu Görüşü ve Uygulamaları

Doktrinde, süre uzatımının hukuki niteliği bazen sözleşme boşluğunun doldurulması olarak yorumlanmaktadır. Bu görüşe göre, taraflar, gecikme riskini sözleşme ile dağıtmayı ihmal etmişlerse, bu durumda sözleşmelerinde bir boşluk bulunacaktır. Bu boşluk, hâkim tarafından doldurulmalıdır. Sözleşme boşluğunu "tarafların gecikme riskini paylaştırmaya dair bir düzenleme yapmamaları" olarak tanımlanmaktadır (Atamer 2005). Sözleşme boşluğu görüşünün benimsenmesi durumunda, hâkimin bu boşluğu doldurması gerektiği açıktır. Ancak, sözleşme boşluğunun nasıl doldurulacağı konusu da önemlidir. Hâkim, tarafların farazi iradesini göz önünde bulundurarak bu boşluğu doldurur. Ancak yedek hukuk kuralları bulunuyorsa, sözleşme boşluğunun öncelikle bu kurallara göre doldurulması gerekebilir. Bu çerçevede, TBK m.473 f.1 ve diğer benzer düzenlemeler, hâkime rehberlik edebilir.

3.6. Kanun Gereği Sürenin Uzaması Görüşünün Değerlendirilmesi

3.6.1. Kendiliğinden Süre Uzaması Durumunun Kanuni ve Hukuki Niteliği

Doktrinde, inşaat sözleşmesinde sürenin, belirli şartların gerçekleşmesi durumunda kendiliğinden uzayacağı kabul edilmektedir. Bu görüş, yüklenicinin bildirim yapması gerekliliğinden bağımsız olarak, inşaat süresinin uzamasını öngörmektedir. Türk Borçlar Kanunu'nun 472. maddesinin 3. fıkrasına göre, yüklenicinin, inşaatın zamanında tamamlanamama riski hakkında bildirimde bulunması gerekse de sürenin uzaması için ekstra bir beyanda bulunmasına gerek bulunmamaktadır (Ayan 2008).

Bu görüşün hukuki niteliği, bildirim yükümlülüğü çerçevesinde değerlendirilmelidir. Eğer bildirim yükümlülüğü, süre uzatımının şartı olarak kabul edilirse, yüklenici bir "bilgi açığa vurması" gerçekleştirmiş olur. Bu durumda, yüklenicinin bir irade açıklamasında bulunmadan yalnızca gecikme riskine ilişkin bilgiyi iş sahibi ile paylaşması yeterli olacaktır. Bildirim yükümlülüğü yerine getirilmediği takdirde, süre uzaması gerçekleşmeyecektir. Bu tür bir bilgi açığa vurulması, tarafların onayı olmaksızın kanun gereği bir hukuki sonuç doğurur.

İnşaat süresinin kendiliğinden uzaması, iş sahibinin yüklenicinin temerrüde düştüğü iddialarına karşı, yüklenicinin itiraz hakkı doğurur. Süre uzatımının geçerli olacağı için, iş sahibinin alacak talep etme hakkı ortadan kalkar. Bu durumda, hâkim, uyuşmazlıkta süre uzatımını resen inceleyebilir. Mahkeme, bu konuda vereceği kararı

tespit hükmü olarak değerlendirir. TBK m.473/1'in amacı göz önünde bulundurulduğunda, yüklenicinin süre uzatımına kendiliğinden hak kazanması gerektiği söylenebilir.

3.6.2. Kanundan Kaynaklanan Talep ve Yenilik Doğuran Haklar

Eğer süre uzatımının kendiliğinden gerçekleşmeyeceği kabul edilirse, süre uzatımının talep edilme yöntemi ve hukuki niteliği üzerine bir değerlendirme yapılması gerekecektir. Bu bağlamda, kanundan doğan bir yenilik doğuran hakkın varlığı mümkün görünmektedir. Yenilik doğuran hakların sınırlı sayı ilkesine tabi olmadığı kabul edilmekte ve yüklenicinin bildirimi ile sürenin uzaması mümkündür. Yüklenici, tek taraflı olarak süreyi uzatabilir. Süre uzatımı gerçekleştiğinde, iş sahibi hâlâ yüklenicinin temerrüde düştüğünü savunursa, yüklenici itirazda bulunabilir. Ancak, yüklenici bu yenilik doğuran hakkı kullanmazsa, süre uzamış olmayacaktır ve hâkimin durumu resen dikkate alması imkânsız hale gelecektir.

Süre uzatımının hukuki temeli olarak kanundan doğan talep hakkı da kabul edilebilir. Bu durumda, gerekli şartlar oluştuğunda, yüklenici iş sahibinden süre uzatımı talep edebilir. Eğer iş sahibi talebe olumlu yanıt vermezse, mahkeme iş sahibinin yerine geçerek sürenin ne kadar uzatılacağını belirleyecektir.

3.7. Süre Uzatımının Önemi

Anglosakson hukuk sistemlerinde, genel prensip yüklenicinin, sözleşme ile kararlaştırılmış olan teslim süresi içerisinde işi tamamlamasıdır. Ancak bu ilkenin iki önemli istisnası bulunmaktadır. İlk olarak, sözleşmede belirtilen süre uzatımı şartlarından biri gerçekleşmiş olabilir. İkinci olarak ise iş sahibinin, davranış veya ihmaliyle işin zamanında tamamlanmasına engel olması mümkündür. Bu durumlarda, sözleşmede belirtilen teslim süresinin geçerliliğini yitirdiği varsayılmaktadır. Hukuki literatürde bu durum, "time at large" kavramı ile ifade edilmekte olup, yeni teslim süresi, yüklenicinin işi tamamlayabileceği makul bir süre olarak belirlenmektedir (Eggleston 2009).

Sözleşmede yer alan orijinal teslim tarihinin bağlayıcılığını kaybetmesi halinde, iş sahibinin gecikme nedeniyle tazminat talep etme hakkı da sona ermektedir. (SCL Protokolü s.22) İş sahibinin, yükleniciye uygun bir süre uzatımı sağladığı durumlarda ise yeniden bağlayıcı bir teslim tarihi belirlenmiş olur ve bu durumda iş sahibinin gecikme tazminatı talep edebilmesi mümkün hale gelir. Bu sebeple, süre uzatımı mekanizmasının yalnızca yüklenici değil, iş sahibi açısından da faydalı bir düzenleme olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca, yalnızca süre uzatımı verilmemesi değil, aynı zamanda makul olmayan bir uzatma sağlanmaması durumunda da bu değerlendirmeler geçerliliğini korumaktadır.

3.7.1. Türk Hukuku Açısından Değerlendirme

Türk hukukunda, yüklenicinin temerrüde düşmesi için kusuru gerekmemektedir (Tandoğan 2010a). Temerrüt, bazı sonuçları açısından kusura bağlı olsa da, iş sahibi yükleniciden gecikme tazminatı talep edemez. Eğer iş sahibi sözleşmeden dönme hakkını kullanırsa, yüklenicinin zararını tazmin etmek zorunda değildir.

Süre uzatımı, iş sahibinin risk alanındaki durumlar nedeniyle verildiği için, yüklenicinin gecikmeden sorumlu olmadığı durumlarda, iş sahibinin temerrüt nedeniyle sahip olduğu haklar arasında aynen ifa talebi ve sözleşmeden dönme bulunur. Süre uzatımı, Türk hukukunda gecikme tazminatı ve cezalarının talep edilmesini engelleyen bir mekanizma olarak işlev görmez.

3.7.2. Belirlilik ve Verimlilik Perspektifinden Zaman Planının Rolü

Süre uzatımının en önemli avantajlarından biri, zaman planlamasının verimli şekilde yapılmasına yardımcı olmasıdır (Eggleston 2009). Süre uzatımı, işin ilerleyen aşamalarında belirli gecikmelerin etkilerini tahmin etme imkânı verir ve böylece teslim tarihine ilişkin belirsizlikleri ortadan kaldırır. Bu durumda, yüklenici iş gücünü ve malzeme kaynaklarını daha verimli kullanabilir. Süre uzatımı verilmediği durumda, teslim vadesinin ne kadar değişeceği konusunda belirsizlik oluşur, bu da kaynakların verimsiz kullanılmasına yol açılabilir.

3.7.3. Sözleşmeden Dönme İmkânının Kaldırılması

Süre uzatımı, iş sahibinin sözleşmeden dönme imkânını kısıtlanmasına yol açabilir. Ancak Türk Borçlar Kanunu m.484, iş sahibine sözleşmeyi feshetme hakkı tanırken, yüklenicinin zararlarını tazmin etme yükümlülüğü de getirmektedir. Süre uzatımı, iş sahibine sözleşmeden dönmeden önce daha dikkatli bir analiz yapma fırsatı sunar. Bu da kaynakların verimli kullanılmasını sağlar, çünkü fesih durumunda kaynakların yeniden tahsis edilmesi ve yeniden ihale yapılması gerekebilir.

3.8. Yüklenicinin Süre Uzatımına Hak Kazanacağı Zaman ve Değerlendirmenin Kim Tarafından Yapılacağı

3.8.1. İnşaat Uygulamasındaki Yaklaşım

Süre uzatımının, yüklenicinin işin devamı sırasında kaynaklarını verimli bir şekilde kullanabilmesi ve işin düzenini belirleyebilmesi açısından büyük bir önemi vardır. Belirsizliklerin ortadan kaldırılması, yüklenicinin daha güvenli bir iş planı yapabilmesine olanak sağlar. Bu amaçla, sözleşme süresi bitmeden önce, iş programını

etkileyebilecek bir gecikme meydana geldiğinde, mümkün olan en kısa sürede süre uzatımı verilmesi gerektiği kabul edilmektedir. (SCL Protokolü, s.23) Bu süre uzatımı, iş sahibinin risk alanından kaynaklanan sebeplerin etkili olduğu tarihe dayanarak verilmelidir. Gecikme etkisi henüz belirginleşmeden de tahmini bir süre uzatımı sağlanabilir. Bu tür bir uzatımın doğası gereği, verilen süre uzatımı tahmini olabilir ve işin tamamlanmasının ardından, gerçek gecikme süresi belirli olduğunda ek bir süre uzatımı gerekebilir.

Süre uzatımı verilmesi gereken bir durumda, iş sahibinin bunu reddetmesi, örtülü hızlandırma (constructive acceleration) durumunu ortaya çıkarabilir. Bu durumda, yüklenici, süre uzatımını alamadığından dolayı işleri hızlandırma gerekliliği hissedebilir. Ancak bu hızlandırma genellikle ek maliyetler doğurur ve yüklenicinin yaptığı harcamalar, iş sahibinden talep edilebilir (Gibson 2008).

Yüklenicinin süre uzatımı talep etmesi durumu, sözleşmede açıkça belirtilmişse, ilgili kişiye başvurulacaktır. İngiliz hukukunda, genellikle mühendis veya iş sahibi bu kararı verebilir. Bu durumda, yargısal denetim aşamasında, süre uzatımının belirlenmiş süreyi aşmadığı sürece, belirlenen uzatım süresi geçerli olacaktır.

İnşaat uygulamasında, gecikme analizi yapılarak, etkilenmiş süreler belirlenir ve buna göre süre uzatımı verilir. Bu analizler bazen tahmini sonuçlar verebilir, çünkü uygulama yöntemine göre geçmişteki kayıtlar eksik olabilir. Bu nedenle, her ne kadar genel kural gecikme analizi sonucu süre uzatımı verilmesi olsa da sağduyulu bir değerlendirme yapılması gerektiği kabul edilmektedir.

3.8.2. Türk Hukukunun Değerlendirilmesi

Türk/İsviçre hukukunda, genel kabul, şartlar oluştuğunda sürenin kendiliğinden uzayacağı yönündedir (Tandoğan 2010b). Bu yaklaşım, yüklenicinin teslim tarihini beklemesine gerek kalmadan, sürenin uzamasına olanak sağlar. Ayrıca, Türk hukukunda, gecikmenin etkilerine ilişkin yapılan değerlendirmeler genellikle tahmini niteliktedir. Bu yaklaşım, işin tamamlanmasından önce yapılan tahminlerin gerçekteki durumla uyumlu olmaması durumunda, yüklenicinin geçmişe etkili bir şekilde süre uzatımını talep etmesine imkân verir. Yargıtay kararlarında da bu durum görülmektedir;

• Y. 15. HD E. 2014/1907 K. 2015/75 T. 14.1.2015: kararına göre; Yüklenicinin iş değişikliği ve sözleşme dışı imalat yapıldığına dair savunması, itiraz niteliği taşır ve karşı dava açılmadan, mahkemenin bu durumu kendiliğinden göz önünde bulundurması gerekir. Mahkeme, fazla imalat olup olmadığını, bu imalatlar için bedele hak kazanılıp kazanılmadığını ve imalatların iş süresine etkisini belirlemelidir.

Türk hukuku açısından değerlendirme yapılırken, iki farklı durum göz önünde bulundurulmalıdır. Sözleşmede, sürenin hangi koşullar altında uzatılabileceği belirtilmiş ve belirleme yetkisi iş sahibine verilmiş olabilir. Bu durumda, şartlar gerçekleşmesine rağmen iş sahibi süre uzatımını belirlemekten kaçınırsa, TBK m.112'ye göre sözleşmeye aykırılık nedeniyle meydana gelen zararın talep edilebileceği ifade edilebilir. İsviçre hukukunda bu konu, akdin müspet ihlali çerçevesinde ele alınmıştır (Werz 1994).

Eğer sözleşmede bu konuda herhangi bir düzenleme yoksa, sözleşmeye aykırılık gündeme gelmeyecektir. Özellikle doktrindeki yaygın görüşe göre, sürenin kendiliğinden uzaması kabul edilecekse, Türk hukukunda örtülü hızlandırma teorisinin uygulanmasına gerek olmadığı söylenebilir. Ancak, Yargıtay, işin devamı süresince süre uzatımı taleplerinin tespit davasına konu olamayacağını kabul etmiştir. Bu belirsizlik durumu, yüklenicinin işi hızlandırma tercihini etkileyebilir. Bu durum, bir iş değişikliği olarak değerlendirilebilir, çünkü işin yapım metodunun değiştirilmesi de bir iş değişikliği sayılmaktadır (Gökyayla 2009). Yüklenici, işi hızlandırabilmek için genellikle iş metodunu değiştirecektir ve iş değişikliği olarak kabul edilen bu durumda, yaptığı masrafları talep etme hakkı doğar.

Türk hukukunda, doktrindeki bir diğer görüş, sürenin şartlar yerine geldiğinde kendiliğinden uzayacağı yönündedir. “Kendiliğinden gerçekleşme” terimiyle, şartların yerine gelmesiyle yüklenicinin süre uzatımına dair bildirimde bulunması gerekmeden sürenin uzayacağı ifade edilmektedir. Bu durumda mahkeme, durumu tespit eden bir karar verecektir. Yüklenici, karşısındaki davada bu durumu savunma olarak ileri sürebilecektir.

Sözleşme boşluğu görüşüne göre, hâkim, boşluğu doldurmak zorunda kalacaktır. Yenilik doğuran hak görüşüne göre ise, yüklenicinin sürenin uzadığına dair bildirimiyle süre uzar. Eğer süre uzatımının şartlarının yerine gelmesi, yükleniciye basit bir talep hakkı tanıyorsa, yüklenicinin talebi üzerine iş sahibi tarafından sürenin uzatıldığı beyan edildiğinde süre uzar.

TBK m.480/2 uyarınca, süre uzatımına hak kazanılacağı kabul edilen hallerde, bunun hâkimin sözleşmeyi uyarlaması yoluyla gerçekleşeceği açıktır. Ancak TBK m.473/1 dikkate alındığında, aynı belirginlikten söz edilemez. Sürenin kendiliğinden uzaması, amaçlanan korumanın sağlanması açısından önemlidir. TBK m.472/3 kapsamındaki bildirim yükümlülüğü, bu uzamanın iş sahibi

bakımından yaratacağı haksız sonuçları engelleme işlevi görmektedir. Ancak TBK m.473/1'in lafzı belirsiz olduğu için, bunun talep hakkı ya da yenilik doğuran hak olarak kabul edilmesinde bir sakınca bulunmamaktadır (Bilgetekin 2020).

Yargıtay uygulamalarında ise 2010 tarihli bir kararda (Y.15. HD E. 2009/1592 K. 2010/1228 T. 4.3.), yüklenicinin süre uzatımı talep etmemesi durumunda, gecikme tazminatının hesaplanması gerektiğine hükmedilmiştir. Bir başka kararında ise, yüklenicinin işin devamı sırasında talep etmediği süre uzatımının, yargılama aşamasında talep edilemeyeceği belirtilmiştir. Bu kararlar, Yargıtay'ın süre uzatımını bir talep hakkı olarak değerlendirdiğini ve sürenin kendiliğinden uzamayacağını kabul ettiğini göstermektedir. 2003 tarihli Yargıtay kararı ise, süre uzatımının tespit hükmü niteliğinde olduğuna dair görüş ortaya koymaktadır. Kararda, yüklenicinin süre uzatımına hak kazanıp kazanmadığı, mahkemece toplanan delillerle değerlendirilecektir. (Y. 15. HD E. 2002/5663 K. 2003/1640 T. 31.3.2003)

3.8.3. Süre Uzatımının Ne Kadar Olacağı

Sürenin ne kadar uzayacağı konusunda doktrinde iki ana görüş bulunmaktadır. Bazı görüşlere göre, sözleşmedeki boşluk tarafların ortak iradeleriyle doldurulacaktır. (Gauch 1999) Diğer görüş ise, sürenin gecikmenin olumsuz etkilerini ortadan kaldıracak şekilde uzayacağını kabul etmektedir (Kostakoğlu 2017).

İnşaat uygulamalarında, genellikle günlük gecikme cezaları öngörülmektedir ve gecikme tazminatı da buna göre hesaplanmaktadır. Yüklenici, süre uzatımını ispatlayamazsa, TBK m.112 uyarınca sorumlu olacaktır. Süre uzatımı, yüklenicinin risk alanı dışında gelişen durumlarla ilgilidir.

Süre uzatımının amacı, yüklenicinin kendi risk alanından doğmayan gecikmelerin etkilerinden korunmasıdır. Bu nedenle, süre uzatımının gerçeğe uygun şekilde hesaplanması gerekmektedir. Sözleşme taraflarının ortak iradesi her zaman gerçek durumu yansıtmamış olabilir. Zira taraflar, ticari gerekçelerle gerçekte yaşanan gecikme süresinden daha kısa bir süre belirleyebilirler. Bu durum, bir belirsizlik yaratır ve zaman içinde değişebilir.

Sonuç olarak, süre uzatımının, yaşanan gecikmenin etkisini ortadan kaldıracak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu süre, gecikme analizleri ve işin devamı süresince tutulan kayıtlara dayanılarak hesaplanmalıdır. Yargıtay, gecikmenin teslim vadesine etkisini dikkate alarak, bilirkişi raporlarına başvurmuştur. Yargıtay, işin teknik niteliği nedeniyle mühendislik bilgisini gerektiren durumlarda, inşaat mühendisinin görüşüne başvurulmaksızın hazırlanmış bir bilirkişi raporuna dayanılarak karar verilemeyeceğine hükmetmiştir. Ayrıca, aynı dönem için birden fazla süre uzatımı talebinin kabul edilemeyeceğini ve süre uzatımının daha sonra dava aşamasında talep edilemeyeceğini kabul etmiştir.

• Y. 15. HUKUK DAİRESİ E. 2001/5330 K. 2002/1349 T. kararına göre; Davacının süre uzatımı alıp almayacağı ve süresinin ne olacağı ile 1991 yılına ait ödenek tutarının 1992 yılına aktarılması gerektiği konularının netleştirilmesi gerekmektedir. İşin çözümü, özel ve teknik bilgi gerektirdiğinden, uyuşmazlık mühendislik bilgisi gerektiren bir mesele olup, bu konuda rapor alınması gereken bilirkişi inşaat mühendisi olmalıdır. Sayıştay deneticilerinin bu konuda uzman kabul edilmemesi nedeniyle, mahkeme inşaat mühendisi bilirkişiden rapor alarak karar vermeli, uzman olmayan kişilerin raporlarına dayanarak yazılı hüküm verilmesi bozma nedenidir.

• Y. 15. HD E. 2010/31 K. 2011/304 T. 25.1.2011 kararına göre; dayanak bilirkişi raporunda, davalı tarafından savunulan fazla imalatların incelenmediği ve bu imalatların inşaat yapım süresini etkileyebileceği göz ardı edilmiştir. Ayrıca, fazla imalat bedelinin tenkisi talep edildiğinden, mahkeme bu talebi incelemeli ve fazla imalatın inşaat süresine etkisini, gerekirse keşif yaparak tespit etmelidir. Ayrıca, fazla imalatın bedeli piyasa fiyatlarına göre hesaplanarak davacı alacağından mahsup edilmelidir. Bu hususlar yeterince incelenmeden karar verilmesi, eksik inceleme nedeniyle bozma sebebidir.

• Y. 15. HD E. 2002/5714 K. 2003/2027 T. 16.4.2003 kararına göre; Mahkeme, ayrı bir heyetten alınacak raporla imar işlemlerinin inşaatın mevcut yapı ruhsatına aykırı olup olmadığını, inşaat süresini etkileyip etkilemediğini ve etkilediyse ne kadar süre uzatımı verilmesi gerektiğini belirlemelidir. Ayrıca, önceki raporlardaki aylık kira bedeline ilişkin çelişkiler incelenmeli ve bu çelişkiler giderildikten sonra elde edilen sonuca göre karar verilmelidir.

3.9. Gecikmenin Süre Uzatımı Açısından Kritik Hattın Önemi

İnşaat projelerinde gecikmenin yalnızca tek bir nedene dayanması oldukça düşük bir olasılıktır. Teslim süresinde meydana gelen bir gecikmenin, illiyet bağının doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için ancak belirli koşullar altında gecikme nedenlerinin bir arada ele alınması gerekebilir. İnşaat projeleri genellikle uzun zaman dilimlerine yayılan birçok iş kaleminden oluşur. Bu durum, özellikle büyük ölçekli projelerde, işlerin gerçekleştirilmesi sırasında bazı gecikmelerin meydana gelmesine yol açabilir. İş sahibinin sorumluluğundaki gecikmeler her ne kadar teslim süresini etkileyebilir gibi

görünse de bu durum doğrudan süre uzatımı hakkı sağlamaz. Süre uzatımı hakkının doğabilmesi için, iş sahibinin sebep olduğu gecikmenin projeyi zamanında teslim etmeye engel teşkil etmesi gerekir. Aksi halde, teslim süresinde herhangi bir engel yoksa süre uzatımı talebine gerek olmayacaktır. Bununla birlikte, iş sahibinin sebep olduğu bir durum, projeyi teslim tarihine ulaştırılamaz hale getiriyorsa, bu durumda söz konusu gecikme etkisini ortadan kaldıracak ölçüde süre uzatımı verilmesi gereklidir. Bu, iş sahibinin neden olduğu gecikme ile teslim süresi arasında bir illiyet bağı kurulmasını zorunlu kılar. Uygulamada, gecikmenin etkili olup olmadığını değerlendirmek için kritik yol metodu sıklıkla kullanılır. Kritik hat, projenin teslim tarihini doğrudan etkileyen faaliyetlerin oluşturduğu hattır. Kritik hatta etkisi olmayan gecikmeler, genellikle teslim süresini doğrudan etkilemediği kabul edilir. Bu bağlamda, kritik hat analizi, inşaat projelerindeki illiyet bağının değerlendirilmesinde önemli bir araçtır. Ancak iş programı kritik yol metoduyla hazırlanmasa dahi, her projenin kendine özgü kritik işleri bulunur. Bu nedenle, kritik hattın varlığı veya kullanılabilirliği, illiyet bağı incelemesinde merkezi bir rol oynamaya devam eder. Türk hukuku, iş sahibinin risk alanından doğan nedenler ile işin teslim süresi arasındaki illiyet bağını belirlemede kritik hat analizine önem vermektedir. Kritik hat analizi ile gecikme nedenleri ve bu nedenlerin teslim süresine etkisi açıkça ortaya konulabilir. Ancak, iş programının karmaşıklığı veya basitliği illiyet bağını belirlemede bir engel teşkil etmez. Daha küçük ölçekli projelerde dahi gecikmelerin ispatı mümkün olabilir ve bu ispat her türlü delille yapılabilir. Bu bağlamda, kritik yol metodu genel olarak kabul gören bir yöntem olsa da somut olayın koşulları dikkate alınarak farklı ispat araçları da kullanılabilir. Kritik hat kavramı, günümüzde inşaat projelerinde gecikme analizlerinde temel bir değerlendirme aracı olarak benimsenmiştir. Kritik hat üzerinde yer alan işler, projeyi teslim süresine doğrudan etkileyen faaliyetlerdir. Bu faaliyetlerin belirlenmesi için iş programının detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve her bir iş kaleminin başlama ve bitiş tarihleriyle birlikte bolluk sürelerinin tespit edilmesi gereklidir. Kritik hattın doğru belirlenmesi, gecikme nedenlerinin projeye etkisini anlamak ve illiyet bağını değerlendirmek açısından vazgeçilmezdir. Türk hukuku çerçevesinde kritik hat analizinin etkili bir şekilde uygulanması, iş sahibinin ve yüklenicinin haklarının korunmasında önemli bir rol oynar.

3.10. FIDIC Özelinde Süre Uzatımı İncelenmesi

FIDIC sözleşmeleri, projelerin teslim şekline bağlı olarak çeşitlilik gösterir ve tarafların sorumluluklarını adil bir şekilde paylaştırarak risklerin dengeli bir biçimde dağıtılmasını hedefler. Bu sözleşme türleri, tarafların görev ve yükümlülüklerini düzenleyen yapısıyla öne çıkmaktadır. Gökkuşağı Serisi olarak adlandırılan ve 1999 yılında yayımlanan FIDIC baskıları (Kırmızı Kitap: İnşaat İşleri Sözleşme Koşulları, Sarı Kitap: Tesis ve Tasarım-Yapım Sözleşme Koşulları, Gümüş Kitap: Tasarım-Tedarik-Yapım/Anahtar Teslimi Sözleşme Koşulları) güncelliğini korumak amacıyla, 2016 yılında oluşturulan bir Görev Grubu tarafından yeniden ele alınmış ve 2017 yılının Aralık ayında güncellenmiş baskılar yayımlanmıştır.

Uluslararası Müşavir Mühendisler Federasyonu (FIDIC), 2017 sürümlerinin revize edilmesindeki temel amacını, sözleşmelerin daha net ve şeffaf hale getirilmesi, uyuşmazlıkların önlenmesi ve proje başarı oranlarının yükseltilmesi olarak açıklamıştır.

Türk Borçlar Kanununa kıyasla FIDIC sözleşmelerinde süre uzatımının maddeler halinde Çizelge 1 çalışması yapılarak özetlenmiştir.

Çizelge 1. Yüklenicinin FIDIC 2017 Sürümündeki Kırmızı Kitap Altında Süre Uzatımı Hakları

MADDE	AÇIKLAMASI	SÜRE UZATIMI
1.9	Gecikmiş Çizimler ya da Talimat	✓
1.13	Yasalara Uyum	✓
2.1	Sahaya Erişim Hakkı	✓
4.6	İş birliği	✓
4.7	Aplikasyon	✓
4.12	Öngörülemeyen Fiziksel Koşullar	✓
4.15	Erişim Yolları	✓
4.23	Arkeolojik ve Jeolojik Bulgular	✓
7.4	Yüklenici Tarafından Yürütülen Testler	✓
7.6	Onarım Çalışmaları	✓
8.5	Tamamlama Süresinin Uzatılması	✓
8.6	Yetkililerin Neden Olduğu Gecikmeler	✓
8.10	İş Sahibi Tarafından İşlerin Askıya Alınmasının Sonuçları	✓
10.2	Kısımların Devralınması	
10.3	Tamamlama Testlerine Müdahale	✓
11.7	Tamamlama Sonrası Erişim Hakkı	
11.8	Yüklenici Araştırması	
13.3.2	Öneri Talebiyle Değişiklik	
13.6	Yasalarda Değişiklikler için Uyarlama	✓
16.1	Yüklenicinin İşi Askıya Alması	✓
16.2	Yüklenici Tarafından Fesih	✓
16.3	Fesih Sonrası Talimatlardan Kaynaklanan Maliyetler	
17.2	İşlerin Bakımı ile İlgili Sorumluluk	✓
18.4	İstisna Olayının Sonuçları	✓

3.11. 4735 Kamu İhale Sözleşmeleri Kanunu Özelinde Süre Uzatımı İncelenmesi

4735 sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanunu, kamu projelerinde sözleşme süresinin uzatılmasına yönelik düzenlemeleriyle, tarafların haklarını koruyarak projelerin aksamadan devam etmesini sağlanmasını hedeflemektedir. Süre uzatımı, özellikle öngörülemeyen ve yüklenicinin kontrolü dışında gelişen durumlarda sözleşmenin feshedilmeden sürdürülebilmesi için önemli bir hukuki mekanizma olarak kabul edilmektedir. Kanunun 10. maddesinde belirtilen süre uzatımı düzenlemeleri, mücbir sebep halleri ve idarenin kusurundan kaynaklanan durumlar gibi çeşitli koşulları kapsamaktadır.

Mücbir sebep kavramı, doğal afetler, savaş, genel grevler, salgın hastalıklar ve benzeri olağanüstü olayları içermektedir. Bu durumlarda yüklenicinin sözleşme yükümlülüklerini yerine getirememesi hâlinde, süre uzatımı talebinde bulunma hakkı doğar. Ancak, süre uzatımı talebinin kabulü için bazı şartların yerine getirilmesi gerekmektedir. Öncelikle, meydana gelen durumun mücbir sebep kapsamında değerlendirilmesi ve yüklenicinin bu sebeple iş programında öngörülen sürelere uyamamasının somut delillerle ispatlanması gerekmektedir. Yüklenicinin, mücbir sebep veya idareden kaynaklanan gecikme nedeniyle süre uzatımı talebini zamanında ve doğru şekilde belgeleyerek idareye sunması, bu sürecin kritik bir parçası olarak kabul edilmektedir.

İdare, yükleniciden gelen süre uzatımı taleplerini değerlendirirken, sözleşme şartlarını, iş programını ve gecikme nedenlerini titizlikle inceler. Bu inceleme sırasında, mücbir sebebin veya idarenin kusurunun proje üzerindeki etkileri dikkate alınır. Süre uzatımı kararı, yalnızca zamanla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda projenin maliyetleri ve cezai şartlar üzerinde de etkili olabilmektedir. Sözleşme süresinin uzatılması hâlinde, ek maliyetlerin nasıl karşılanacağı veya gecikme cezalarının uygulanıp uygulanmayacağı hususu, taraflar arasında sözleşmede belirlenen hükümlere göre karara bağlanır.

Uygulamada, mücbir sebep ve idare kusuru gibi süre uzatımına temel teşkil eden durumların tespiti ve belgelenmesi süreçlerinde bazı sorunlar yaşanabilmektedir. Özellikle idarelerin farklı yorum ve değerlendirme kriterleri benimsemesi, yüklenicilerle idareler arasında uyuşmazlıklara neden olabilmektedir. Bu tür belirsizlikler, projelerin zamanında tamamlanmasını olumsuz etkileyebilir ve kamu kaynaklarının verimsiz kullanımına yol açabilir.

Sonuç olarak, 4735 sayılı Kanun'daki süre uzatımı hükümleri, kamu projelerinin devamlılığını sağlamak ve taraflar arasındaki dengeyi korumak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, uygulamada ortaya çıkan aksaklıkların giderilmesi ve süre uzatımı süreçlerinin daha şeffaf ve standart bir yapıya kavuşturulması gerekmektedir. Bu bağlamda, kanunda yapılacak iyileştirmelerle, süre uzatımı taleplerinin değerlendirilmesinde daha net ve objektif kriterler oluşturulması hem yüklenicilerin hem de idarelerin haklarının korunmasına katkı sağlamaktadır.

4. İnşaat Projelerinde Süre Uzatımının Mühendislik Açıdan İncelenmesi

4.1. İnşaat Projelerinde Proje Planlama Teknikleri

İnşaat projelerinde iş programı, projenin planlanması ve yönetilmesi için hayati öneme sahiptir. Özellikle, iş programı aracılığıyla işlerin sıralaması, süreleri, ilişkileri ve maliyet kalemleri belirlenerek proje kaynaklarının verimli kullanımı sağlanabilir. Bu süreç hem teknik hem de hukuki açılardan projelerin başarıyla yürütülmesi için kritik rol oynamaktadır. Günümüzde kullanılan çeşitli iş programlama yöntemleri, inşaat projelerinin karmaşıklığına uygun şekilde seçilmektedir. Bu yöntemler arasında Gantt Şeması, Kritik yol metodu (CPM), PERT ve daha az bilinen Lineer Diyagram, Kutu Diyagramı (Activity on Node - AoN) ve Ok Diyagramı (Activity on Arrow - AoA) yer almaktadır.

4.1.1. İş Programı Türleri ve İnşaat Mühendisliğindeki Rolü

İş programları, inşaat projelerinin zamanında tamamlanması için sadece planlama değil, aynı zamanda teknik ve hukuki değerlendirmeler için de vazgeçilmez araçlardır. Projenin tamamlanması için gerekli işlerin sıralı bir şekilde belirlenmesi, bu işler arasındaki bağımlılık ilişkilerinin tespiti ve iş sürelerinin hesaplanması, iş programı türlerinin seçiminde belirleyici faktörlerdir.

i. Gantt Şeması: Gantt Şeması, işlerin sırasını ve sürelerini yatay çubuk grafikler halinde gösterir. Basit inşaat projelerinde etkili olsa da iş ilişkilerini yeterince yansıtamaması nedeniyle karmaşık projelerde sınırlı bir kullanım alanına sahiptir (Uyanık 2018). Ancak, görsel olarak kolay anlaşılabilir yapısı sayesinde proje ekibi arasında iletişim ve koordinasyonu artırabilir. Ayrıca yapısı gereği kaynak yönetimi kolay takip edilecek bir yöntem değildir.

ii. Kritik yol metodu (CPM): CPM, bir projenin başlangıcından sonuna kadar geçen en uzun yol olan kritik hattı belirler (Gibson 2008). Kritik işler, projenin teslim süresini doğrudan etkileyen faaliyetlerdir. Kritik olmayan işler ise belirli bir gecikme payına sahiptir. CPM, işlerin sıralamasını, sürelerini ve gecikme durumlarını analiz

ederek hem teknik hem de hukuki değerlendirmeler için temel oluşturur.

iii. PERT (Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği): PERT, özellikle belirsizliklerin yüksek olduğu projelerde kullanılır. Bu yöntemde faaliyetlerin süreleri; iyimser, kötümser ve en olası tahminler üzerinden hesaplanır (Keane ve Caletka 2015). Belirsizliklerin yönetilmesi gereken büyük projelerde sıklıkla tercih edilir.

iv. Lineer Diyagram (Linear Tracking): Lineer Diyagram, özellikle süreklilik arz eden inşaat projelerinde (örneğin yol veya boru hattı projelerinde) kullanılır. İşlerin sürekliliğini ve zaman-mesafe ilişkisini grafiksel olarak temsil eden bu yöntem, işlerin eş zamanlı yürütülmesi gereken projelerde etkilidir. Süre uzatımı taleplerinde, işlerin ne zaman ve nerede kesintiye uğradığının tespiti için önemli bilgiler sağlar.

v. Kutu Diyagramı (Activity on Node - AoN): AoN yöntemi, faaliyetleri düğümler (kutu) ile temsil eder ve bu düğümler arasındaki bağlantılar faaliyetler arası bağımlılığı gösterir. İşlerin hangi sırayla yapılması gerektiğini ve faaliyetler arası ilişkiyi net bir şekilde ortaya koyar. Teknik olarak daha karmaşık olmasına rağmen, CPM ile uyumlu çalışarak projenin yönetiminde detaylı bir analiz sağlar.

vi. Ok Diyagramı (Activity on Arrow - AoA): AoA yönteminde işler oklar ile temsil edilir ve bu oklar düğümler arasında bağlantılar kurar. Bu yöntem, faaliyetlerin sırasını belirlerken ilişkilerinin görselleştirilmesinde oldukça etkilidir. Ancak, iş ilişkilerinin karmaşık olduğu projelerde kullanım zorluğu nedeniyle daha az tercih edilir.

İş programlarının hukuki bağlamdaki en önemli işlevi, süre uzatımı taleplerinin değerlendirilmesidir. Proje sırasında yaşanan değişikliklerin veya gecikmelerin etkilerini analiz etmek için iş programının doğru ve güncel olması gereklidir. Kritik yol metodu gibi detaylı analiz yöntemleri, iş sahibinden veya yükleniciden kaynaklanan gecikmelerin etkilerini ayrı ayrı değerlendirme olanağı sunar. Bu, illiyet bağı değerlendirmesi yapılarak süre uzatımı ve buna bağlı parasal taleplerin gerçeğe uygun şekilde hesaplanmasını sağlar.

Kritik yol metodu, Lineer Diyagram, Kutu ve Ok Diyagramları gibi araçlar, teknik inşaat mühendisliği açısından işlerin sıralamasını ve kaynakların kullanımını optimize ederken, hukuki açıdan da taraflar arasındaki uyuşmazlıkların çözümünde yol gösterici olmaktadır. Örneğin, kritik bir işte meydana gelen gecikme nedeniyle yüklenici hızlandırma önlemleri almak zorunda kalmışsa, bu önlemlerin maliyeti iş sahibine yüklenebilir. Aynı şekilde, iş sahibinden kaynaklanan gecikmelerin süre uzatımına olan etkisi bu araçlarla somut ve ölçülebilir hale getirilebilir.

İnşaat projelerinde iş programı, yalnızca proje yönetimi ve kaynak optimizasyonu için değil, aynı zamanda hukuki süreçlerde adil değerlendirmeler yapılması için kritik öneme sahiptir. CPM, PERT, Gantt Şeması, Lineer Diyagram, Kutu Diyagramı ve Ok Diyagramı gibi yöntemlerin etkin kullanımı, süre uzatımı ve parasal taleplerin doğru şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Bu nedenle hem teknik hem de hukuki süreçlerde iş programlarının detaylı ve güncel tutulması, projenin başarıya ulaşmasında önemli bir faktördür.

4.2. İnşaat Projelerinde Gecikme Analizi

TBK ilgili maddelerine göre, süre uzatımı ve ek süre taleplerinin olumlu olarak değerlendirilmesi için ispat yükümlülüğü her zaman yüklenicinin üzerinde bulunmaktadır. Bu doğrultuda, talebin teknik mühendislik çalışmalarıyla desteklenerek raporlanması, bilimsel açıdan daha kuvvetli ve açıklayıcı bir argüman sunmakta, yüklenicinin talebinin haklılığını daha etkili bir şekilde ortaya koymaktadır.

Proje teslim süresinin gecikmesinde, TBK madde 123'te öngörülen ek süre verilmesini gerektiren bir durumun mu yoksa madde 124 kapsamında süre verilmesini gerektirmeyen bir durumun mu mevcut olduğunun tespiti oldukça önemlidir. Bu ayrımın doğru yapılabilmesi için, planlama mühendisleri tarafından hazırlanmış CPM (Critical Path Method-Kritik Yol Metodu) iş programına dayalı analizlerin yapılması gereklidir. CPM yöntemi, planlanan süre ve gecikmelerin açıkça ortaya konulmasını sağlamakta, bu sayede gecikmelerin kaynağının ve etkilerinin net bir şekilde belirlenmesine imkân tanımaktadır.

Bunun yanı sıra, gecikmelerde sorumlu olan tarafın belirlenmesi kritik bir aşamadır. Eğer gecikmeler birden fazla tarafın sorumluluğunda ise, bu sorumluluğun taraflar arasında adil bir şekilde paylaşılması için teknik raporlar ve analizler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, taraflar arasında oluşabilecek anlaşmazlıkların çözümünde önemli bir dayanak sunar.

Gecikmeler mazur görülebilen ve mazur görülmeyen gecikmeler olarak ikiye ayrılmaktadır (Romzi ve Shu 2022). Mazur görülebilen gecikmeler ise kendi içerisinde telafi edilebilir ve telafi edilemez gecikmeler olarak sınıflandırılmaktadır. Mazur görülebilir ve telafi edilebilir gecikmeler iş sahibi kaynaklı olurken, mazur görülebilir ancak telafi edilemez gecikmeler mücbir sebeplerden kaynaklanmaktadır. Gecikmelerin sınıflandırılmasına göre hak talepleri Çizelge 2'de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Gecikme çeşitleri karşısında hak talebi durumları

	Mazur görülebilir-Telafi edilebilir gecikme	Mazur görülebilir-Telafi edilemez gecikme	Mazur görülmeyen gecikme
Yüklenicinin ek süre talebi	✓	✓	✗
Yüklenicinin gecikme maliyeti	✓	✗	✗

Yüklenici, projenin teslim süresini etkileyen ve gecikmelere sebep olan iş kalemlerinin mazur görülebilir nitelikte olduğunu kanıtladığı takdirde ek süre talebinde bulunabilir. Ancak bu durumun ispatı yüklenicinin sorumluluğunda olup, planlama mühendisinin hazırlayacağı teknik raporlara dayalı olarak iş sahibine delil sunulmasını gerektirir. Yazılı ve teknik bir veri olmaksızın yapılan süre uzatımı talepleri, ticari özen ve basiretli bir tacirin davranışıyla bağdaşmamaktadır.

İnşaat projelerinde teslim süresini etkileyebilecek gecikmelerin kaynağı, yüklenici, işveren veya mücbir sebepler olabilir. Projelerin karmaşıklığı, özgün niteliği ve imalat kalemlerinin fazlalığı nedeniyle bu tür gecikmelerin tespiti, ancak iş programının takibi ve düzenli güncellenmesiyle mümkün hale gelir. Hazırlanan iş programı, şantiyeden alınan raporlarla sürekli güncellenmeli ve bu güncellemeler ışığında gecikmelerin kritik yol üzerindeki iş kalemlerinden kaynaklanıp kaynaklanmadığı analiz edilmelidir. Kritik yol üzerindeki bir iş kaleminden kaynaklanan gecikme tespit edildiğinde, bu durum gecikmeden sorumlu tarafın belirlenmesi ve buna bağlı yaptırımların (örneğin, gecikme cezası) uygulanması açısından önem taşır. Aynı şekilde, kritik yol dışındaki iş kalemlerinin gecikmeleri, bu kalemlerin bolluk sürelerini aşmadığı sürece proje teslim tarihini doğrudan etkilemez.

Projelerde gecikmelerin analizi, iş programları ve çeşitli teknik yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Bu süreçte geçmişte meydana gelmiş (retrospektif) ya da gelecekte oluşabilecek (prospektif) gecikmelerin hesaplanmasına gecikme analizi adı verilir. Gecikme analizleri, gecikmelerin sebeplerini ve etkilerini belirleyerek bunların proje taraflarına adil bir şekilde dağıtılmasını sağlar (Çevikbaş 2024).

Yüklenicinin süre uzatımı talebinde bulunabilmesi için öncelikle gecikmeye neden olan iş kalemlerinin kritik yol üzerinde olduğunu ispat etmesi gerekir. Alternatif olarak, kritik yol dışında yer alan iş kalemlerinin bolluk sürelerinin tüketilmesi sonucu bu iş kalemlerinin kritik hatta dahil olduğunu göstermelidir. Bu tespitler yapıldıktan sonra uygun gecikme analizi yöntemleri ile gecikme nedenleri detaylı şekilde analiz edilebilir. Gecikme analizinin ardından, gecikmeden sorumlu tarafın belirlenmesi veya eş zamanlı gecikmelerin söz konusu olduğu durumlarda sorumluluk paylarının adil bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. İnşaat projelerinde süre uzatımı taleplerinin yönetimi ve gecikme analizleri, projelerin teknik ve hukuki süreçlerinin yönetiminde kritik bir rol oynar. Doğru bir gecikme analizi, proje taraflarının haklarını koruma ve uyuşmazlıkları çözme açısından önemli bir araçtır.

4.2.1. Gecikme Analizi Türleri

Gecikme analizi, inşaat projelerinde gecikme sebeplerinin ve bu sebeplerin teslim süreleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde kritik bir araçtır (Keane ve Caletka 2015). Günümüzde birçok gecikme analizi yöntemi geliştirilmiştir ve bu yöntemlerin her biri, spesifik durumlara bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu bağlamda, sözleşmelerde hangi gecikme analizi yönteminin kullanılacağının önceden belirlenmesi, olası uyuşmazlıkların önlenmesinde önemli bir role sahiptir.

Sözleşmelerde belirli bir gecikme analizi yöntemine yer verilmediği durumlarda, hangi yöntemin kullanılacağına karar vermek hukuki açıdan karmaşık bir süreç olabilir. Gecikme analizi yöntemlerinden hiçbiri tamamen kusursuz değildir ve her yöntemin avantajları ile sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu nedenle, gecikme analizine ihtiyaç duyulan anın özellikleri ve tarafların ihtiyaçları dikkate alınarak, somut olay için en uygun yöntemin seçilmesi gereklidir. Nitekim, bu esneklik ihtiyacı nedeniyle SCL Protokolü, ilk baskısında "zaman etki analizi" (time impact analysis) yöntemine öncelik vermişken, sonraki baskısında herhangi bir yöntemi doğrudan önermemeyi tercih etmiştir. (SCL protokolü, s.3)

Gecikme analizi yöntemleri genellikle belirli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Örneğin, analizin kritik hattı dikkate alıp almadığı, ileriye dönük (prospektif) ya da geçmişe dönük (retrospektif) bir yaklaşımla yapılıp yapılmadığı ve iş programının güncellenip güncellenmediği gibi hususlar, analizin sonucunda etkili olmaktadır. İleriye dönük analizler daha öngörüye dayalıdır ve gelecekteki muhtemel etkileri değerlendirmeye odaklanır. Buna karşın, geçmişe dönük analizler, gerçekleşmiş verileri esas alarak daha gerçekçi ve somut sonuçlar ortaya koymaktadır. Özellikle, sözleşmede iş devam ederken süre uzatımı hesaplamalarının yapılması gerektiği belirtilmişse, ileriye dönük bir analizin tercih edilmesi gereklidir. Kritik hattın dikkate alınmaması veya güncellenmeyen iş programına dayalı analizlerin genellikle gerçekçi sonuçlar vermediği

eleştirilmektedir. Bu doğrultuda, gecikme analiz yöntemlerinin seçiminde, projenin koşulları ve ihtiyaçlarına uygun bir metodolojinin benimsenmesi önemlidir.

İnşaat projelerinde gecikmelerin etkilerini değerlendirmek, projenin planlanan teslim süresi üzerindeki etkileri anlamak ve bu etkilerin sorumluluğunu belirlemek için gecikme analizleri hayati bir rol oynamaktadır. Bu analizler, taraflar arasında doğabilecek uyuşmazlıkların çözümünde bilimsel ve nesnel bir temel sağlar. Çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilen gecikme analizlerinin her biri, projenin kapsamına, büyüklüğüne ve tarafların ihtiyaçlarına uygun şekilde seçilmelidir. Aşağıda, bu sınıflandırmaları temel alan bazı gecikme analiz yöntemleri örnekleri açıklanmaktadır.

4.2.1.1. Planlanan-Gerçekleşen Gecikme Analizi (As Planned vs. As Built)

Bu yöntem, planlanan iş programı ile gerçekleşen iş programının karşılaştırılması esasına dayanır. Analiz sırasında, her bir faaliyet için yaşanan gecikmeler belirlenir ve teslim tarihine etkileri incelenir. Basit projelerde veya planlanan ve gerçekleşen iş programlarının birbirine yakın olduğu durumlarda etkili sonuçlar sunar. Teknik olarak bu analizde;

• Kritik hat dikkate alınmaz.
• Gecikmenin hangi iş kaleminde olduğu ve bu gecikmenin teslim tarihine doğrudan etkisi değerlendirilir.
• Özellikle iş durmalarının yaşandığı durumlarda net sonuçlar elde edilebilir.

Bununla birlikte, bu yöntem karmaşık projelerde veya planlanan program ile gerçekleşen program arasında ciddi farklılıkların olduğu durumlarda gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Kritik hat üzerinde olmayan iş kalemlerindeki gecikmelerin teslim tarihine etkisi hesaplanamaz. Ayrıca bu yöntemin basitliği, detaylı gecikme analizleri gerektiren davalarda sınırlı bir kullanım alanı yaratır.

4.2.1.2. Etkilenen Planlanan Gecikme Analizi (Impacted As-Planned)

Bu yöntemde, gecikmeler yüklenicinin hazırladığı başlangıçtaki iş programına eklenerek, teslim tarihine etkileri analiz edilir. Kritik yol metoduna dayanan yazılımlar bu süreçte önemli bir rol oynar. Gecikmeler, genellikle kronolojik sıraya göre programa eklenir ve bu eklemeler sonucunda teslim tarihine etkiler hesaplanır. Teknik olarak bu analizde;
• İleriye etkili bir yöntemdir: Gecikmelerin tahmini etkileri analiz edilir.
• Kritik hat kullanımı: Yazılım desteğiyle gecikmelerin teslim tarihine etkisi detaylı bir şekilde hesaplanabilir.
• Tahmini nitelik: Gerçekleşen iş programı yerine planlanan programın kullanılması, tahmini sonuçlara neden olur.

Bu yöntemin avantajları arasında hazırlanmasının nispeten düşük maliyetli olması sayılabilir. Ancak, projenin yapımı sırasında meydana gelen değişiklikler, iş sıralamasındaki değişiklikler veya hızlandırma gibi unsurlar dikkate alınmadığı için eleştirilmektedir. Bazı durumlarda mahkemeler, bu yöntemin delil niteliğini sorgulamakta ve kullanmaktan kaçınmaktadır (Pickavance 1997).

4.2.1.3. Zaman Etki Analizi (Time Impact Analysis)

Zaman etki analizi, ileriye etkili bir yöntem olup, her bir gecikmenin projeye etkisini güncel planlanan programa göre analiz eder. Bu yöntemde, gecikme sebebinden önceki durum tespit edilerek, gecikmenin etkisi her bir aşamada değerlendirilmektedir. Kritik hattın güncel durumu dikkate alındığından, diğer analiz yöntemlerine kıyasla daha gerçekçi sonuçlar sunabilir. Teknik olarak bu analizde;

• Güncellenmiş iş programları kullanılır: Her bir gecikme öncesinde mevcut olan program üzerinden analiz yapılır.
• Alt ağlar oluşturulur: Her bir gecikme sebebi için alt analizler gerçekleştirilir ve bu etkiler genel programa eklenir.
• Doğruluk oranı yüksektir: Kritik hattın dinamik yapısı ve güncellemeler dikkate alınır.

Bu yöntemin dezavantajları ise hazırlanmasının karmaşık ve maliyetli olmasıdır. Proje devam ederken yapılacak analizler, gecikme etkilerinin tahmini nitelikte olmasına neden olabilir. Ancak, proje tamamlandıktan sonra gerçekleşen iş programına göre yapılan değerlendirmeler daha somut sonuçlar sunar. Sözleşmede süre uzatımı kararlaştırılmış ise, bu yöntem sürecin doğru bir şekilde yürütüldüğünün tespit edilmesinde önem taşır.

4.2.1.4. Windows Gecikme Analizi (Windows Analysis)

Windows gecikme analizi, bir projenin zaman çizelgesini belirli dönemlere (pencerelere) bölerek, her bir pencere içinde gerçekleşen gecikmelerin teslim tarihine etkisini analiz etmeye dayanır. Bu yöntem, projenin dinamik yapısını anlamak için kullanılan en esnek ve etkili analizlerden biridir. Teknik olarak bu analizde;

• Pencere yaklaşımı kullanılır: Proje süreci, genellikle aylık veya kritik olaylara göre belirlenen zaman dilimlerine ayrılır.

• Güncellemeler dikkate alınır: Her bir pencere sonunda gerçekleşen iş durumu analiz edilir ve mevcut kritik hat üzerinden değerlendirme yapılır.
• Sürekli takip: Analiz, projenin ilerlemesi sırasında düzenli olarak uygulanabilir ve bu sayede projenin genel durumu hakkında gerçek zamanlı bilgiler sunar.

Bu yöntemin en büyük avantajı, proje boyunca meydana gelen gecikmeleri ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmesi ve her bir pencerenin bağımsız bir analiz birimi olarak değerlendirilmesidir. Ayrıca, birden fazla gecikme sebebinin aynı anda meydana geldiği durumlarda, bu nedenlerin etkilerini ayrı ayrı analiz edebilme yeteneği sunar. Ancak yöntemin uygulanması karmaşık olabilir ve yoğun bir veri yönetimi gerektirebilir. Özellikle büyük ölçekli projelerde bu durum, zaman ve maliyet açısından bir yük oluşturabilir.

4.2.1.5. Kazanılmış Değer Analizi (Earned Value Analysis - EVA)

Kazanılmış Değer Analizi, bir projenin zaman ve maliyet performansını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Zaman yönetimi ile bütçe kontrolünü entegre bir şekilde değerlendirdiği için gecikme analizleriyle birlikte sıklıkla kullanılmaktadır. Bu analiz, sadece gecikmeleri belirlemekle kalmaz; aynı zamanda bütçe üzerindeki etkileri de göz önünde bulundurur. Teknik olarak bu analizde;

Temel göstergeler kullanılır:
• Kazanılmış Değer (EV): Belirli bir anda tamamlanan iş miktarını temsil eder.
• Planlanan Değer (PV): Belirli bir zamanda tamamlanması planlanan işin değeridir.
• Gerçekleşen Maliyet (AC): Aynı zaman diliminde projeye harcanan gerçek maliyeti ifade eder.
Performans oranları hesaplanır:
• Zaman Performans İndeksi (SPI): Projenin zamanlama açısından ne kadar ileride veya geride olduğunu gösterir. SPI= EV / PV
• Maliyet Performans İndeksi (CPI): Projenin bütçeye uyumunu değerlendirir. CPI=EV / AC
Bu yöntemin avantajları arasında, projeye ilişkin genel bir performans resmi sunması yer alır. Ayrıca hem geçmişe dönük değerlendirme hem de ileriye dönük tahmin yapma kapasitesine sahiptir. Ancak, EVA' nın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, başlangıçta belirlenen maliyet ve zaman hedeflerinin gerçekçi ve doğru bir şekilde tanımlanmış olması gerekmektedir. Aksi takdirde analiz, yanıltıcı sonuçlara yol açabilir.

Gecikme analizi yöntemlerinin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için makul bir iş programının hazırlanması şarttır. Kritik yol metoduna uygun olarak hazırlanan, düzenli şekilde güncellenen ve gerçek durumu yansıtan iş programları, analizlerin doğruluğunu artırır. Tarafların sözleşmelerinde hangi yöntemin kullanılacağına dair açık düzenlemeler yapılması, uyuşmazlıkların çözümünde ve süreçlerin hızlandırılmasında etkili olacaktır. Projenin karmaşıklığı ve sözleşmesel yükümlülükler dikkate alınarak, en uygun gecikme analizi yöntemi seçilmelidir.

Gecikme analizleri, projenin ilerleyişini hem zaman hem de maliyet perspektifinden değerlendirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Her yöntemin avantaj ve dezavantajları olduğu gibi, her biri belirli bir duruma daha uygun sonuçlar sunabilir. Örneğin:

• Basit projelerde Planlanan-Gerçekleşen Analiz tercih edilebilir.
• Süreç boyunca güncelleme gerektiren projelerde Windows Analizi etkili sonuçlar sunar.
• Hem zaman hem de maliyet performansını dikkate almak için Kazanılmış Değer Analizi entegre bir yaklaşım sağlar.
Taraflar, sözleşmelerinde hangi analiz yöntemini tercih edeceklerini önceden belirlemelidir. Böylece uyuşmazlık durumlarında sürecin şeffaflığı artar ve tarafların haklılıklarını ispatlaması kolaylaşır. Ayrıca, analizlerin uygulanabilirliği için doğru ve güncel veri yönetiminin sağlanması gereklidir.

Gecikme analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu sağlamak adına kullanılan analiz yönteminin seçimi önemli bir rol oynasa da taraflarca özellikle yüklenici tarafından düzenli ve kapsamlı bir şekilde tutulan kayıtların da analizin güvenilirliği üzerindeki etkisi büyüktür. Geçmişe dönük olarak yapılan yargılamalarda veya değerlendirmelerde olayların zamanla unutulması ya da yanlış hatırlanması gibi olasılıklar, kayıtların detaylı bir şekilde tutulmaması durumunda, doğru bir analizin yapılmasını güçleştirebilir. Bu bağlamda kayıtlar, yalnızca geriye dönük analizlerde değil, iş sürecinde yapılacak ileriye dönük değerlendirmeler için de kritik bir öneme sahiptir.

SCL Protokolü, kayıt tutmanın gecikme analizindeki önemini açıkça vurgulamış ve bu konuda ayrıntılı düzenlemeler yaparak taraflara rehberlik etmiştir. Protokol, uyuşmazlıkların önlenmesi veya çözüm sürecinin kolaylaştırılması amacıyla, tarafların sözleşmelerinde hangi kayıtların tutulacağına ilişkin açık bir anlaşmaya varmaları gerektiğini belirtmiştir. Protokole göre, bu tür kayıtların kapsamı oldukça geniştir ve şu unsurları içermelidir:

• Masraf Kayıtları: Proje sürecinde oluşan maliyetlerin detaylandırıldığı veriler.

• İlerleme Kayıtları: İş programı çerçevesinde gerçekleştirilen işlerin aşamalarını ve durumlarını gösteren bilgiler.

• Yazışmalar: Taraflar arasında yapılan tüm resmi yazışmalar ve bildirimler.

• Sözleşme Belgeleri ve Değişiklikleri: Projenin başlangıcında yapılan sözleşmeler ve süreç içinde yapılan revizyonların tüm detayları.

Bu tür kayıtların düzenli olarak güncellenmesi ve saklanması, analiz süreçlerinin doğruluğunu artırmanın yanı sıra, taraflar arasında oluşabilecek uyuşmazlıkların çözümünde somut birer delil olarak kullanılmasını da kolaylaştırır. Aynı zamanda, doğru kayıt tutma uygulamaları, projede ilerleme sağlanırken oluşabilecek risklerin daha erken tespit edilmesine olanak tanır ve projenin daha sağlıklı bir şekilde yönetilmesine katkı sağlar. Bu bağlamda, tarafların, sözleşme aşamasında kayıt tutma ile ilgili kapsamlı ve net düzenlemelere yer vermesi, projelerin hukuki ve teknik açılardan daha sağlam bir zemine oturtulmasını mümkün kılacaktır.

Literatür göz önünde bulundurularak, gecikme analizi yöntemi seçilirken göz önünde bulundurulması gereken etkenler aşağıda listelenmiştir (Çevikbaş 2024).

Çizelge 3'te belirtilen bu faktörlerin değerlendirilmesinin, mutlaka projenin kendine özgü koşulları çerçevesinde yapılması gerektiği ifade edilmektedir. Bu durum, gecikme analizinin her proje için evrensel bir uygunluk sergilemeyeceğini açıkça göstermektedir. Örneğin, saha kayıtlarının düzenli tutulmadığı ve iş programının güncellemelerinin yapılmadığı bir projede, Windows Gecikme Analizi yönteminin uygulanmasının oldukça güç hale geleceği belirtilmektedir. Bu gibi durumlarda, veri eksikliklerinin analizin doğruluğunu ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebileceği ve bunun da alternatif yöntemlerin tercih edilmesini gerektirebileceği vurgulanmıştır.

Çizelge 3. Gecikme Analizi Seçimini Etki Eden Başlıca Faktörler

#	Gecikme Analizi Seçimini Etki Eden Başlıca Faktörler	(Adhikaril ve ark , 2006)	(Arditi ve Pattanakitchcamroon, 2006)	(Braimah ve Ndekugri, 2007)	(Perera ve ark., 2016)	(Society of Construction Law, 2017)
	Gecikme Analizi Gereksinimleri					
1	Saha Kayıtlarının Varlığı	✓	✓	✓	✓	✓
2	Uygun programların Varlığı (İş Programı, Gecikme Analizi Programı, Ofis vb.)			✓		
3	Uzmanın Becerileri			✓		
4	Zaman	✓	✓		✓	✓
5	Maliyet	✓	✓	✓	✓	
6	İş programının Güncellenmesi Varlığı			✓	✓	✓
7	Ana İş Programı			✓	✓	✓
	Gecikme Analizi Yönteminin Kapasitesi					
8	Kompleks Gecikmelerin Çözümlenebilmesi			✓	✓	
9	Çok Sayıda Gecikme Olayı Çözülebilmesi			✓		
10	Sorunlu Tarafları Tespit Edebilmesi			✓		
11	Eş Zamanlı Gecikmelerin Tespit Edilebilmesi				✓	
	Gecikme Analizi Yapıldığı Zaman					
12	Proje Aşamasında	✓	✓	✓	✓	
13	Proje Tamamlanması Sonrasında	✓	✓	✓	✓	
	Kabul Görme					
14	Anlaşmazlık Çözüm Kurulları Tarafından Kabul Edilebilirlilik				✓	
	Proje Karakteristiği					
15	Proje Süresi			✓		
16	Projenin Kompleksliği			✓		
17	Hak Talebi Miktarı			✓	✓	✓
18	Projenin Büyüklüğü			✓	✓	
19	Projenin Bedeli				✓	✓

Çizelge 3. (devam) Gecikme Analizi Seçimini Etki Eden Başlıca Faktörler

	Sözleşmenin Bağlayıcılıkları			
20	Sözleşmede Gecikme Analizi Yönteminin Belirtilip Belirtilmediği		✓	✓
21	Yasal Mevzuat	✓		
22	Sözleşme Türü	✓		
23	Anlaşmazlık Çözüm Kurulu (Mahkeme, Tahkim, Arabulucu vb.)	✓		✓

Çizelge 4. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 15.165.1003 Pozunun İşçilik Rayiçleri

Rayiç No	Rayiç No Tanım	Birim	Miktar
R-19.100.1089	Demir doğrama imalat atölyesinin 1 saatli ücreti	Saat	7
R-10.100.1019	Soğuk demirci ustası	Saat	1,8
R-10.100.1062	Düz işçi (inşaat işçisi)	Saat	1,8

Çizelge 5. CPM'li iş programı ve Bolluk Hesapları Çizelgesi

Aktivite No	Aktivite	Birim	Miktar	Birim Adam/Saat	Birim Atölye/Saat	Toplam Adam/Saat	Toplam Atölye/Saat	Günlük Çalışma Süresi (saat)	İşçi Sayısı	Süre	Öncül	İlişki	Toplam Bolluk	Serbest Bolluk
A	İşveren Projeye Uygun Kolon ve Kiriş Malzeme Kesitlerinin Atölyeye Teslimi	Ton	25	-	-	-	-	-		5	-	-	0	0
B	Yüklenicinin Atölyesinde Kolon-Kiriş İmalatının Yapılması ve Şantiyeye Sevki	Ton	25	-	17,7	-	442,5	8	3	19	A	FS+2	2	2
C	İşveren Projeye Uygun Çapraz, Çatı ve Cephe Aşık Malzeme Kesitlerinin Atölyeye Teslimi	Ton	15	-	-	-	-	-		5	A	SS+14	0	0
D	Yüklenicinin Atölyesinde Çapraz, Çatı ve Cephe Aşık İmalatının Yapılması ve Şantiyeye Sevki	Ton	15	-	17,7	-	265,5	8	3	12	C	FS+2	0	0
E	İmalatı Bitmiş Elemanların Montajı	Ton	40	3,6	-	144	-	8	3	6	B D	FS+7 FS+1	0	0

- FS (Finish-to-Start) → Bitişten Başlangıca
- FF (Finish-to-Finish) → Bitişten Bitişe
- SS (Start-to-Start) → Başlangıçtan Başlangıca
- SF (Start-to-Finish) → Başlangıçtan Bitişe

5. Örnek Üzerinden Gecikme Analizi ve Yorumlanması

5.1. Örnek Projenin Sözleşme Özeti ve İş Programının Hazırlanması

İşveren A firması, çelik konstrüksiyon fabrika yapımı projesi kapsamında yüklenici B firması ile bir sözleşme imzalamıştır. Sözleşme hükümleri çerçevesinde, proje ve inşaat ruhsatları hazır olan bu inşaat yapım çalışması için aşağıdaki koşullar belirlenmiştir:

• Proje Kapsamı: Çelik konstrüksiyon fabrika projesinin, işveren tarafından sağlanacak malzemeler kullanılarak yüklenici tarafından imalat ve montajının gerçekleştirilmesi.

• Süre Taahhüdü: İşin toplam süresi 40 gün olarak belirlenmiştir.

• İş Programı: Aktivitelerin sürelerinin, adam/saat hesaplarının, aktive bolluklarının ve aktivitelerin bağlantılarının Ana Plan çerçevesinde oluşturulup, Kritik Yol Metodu ile hazırlanacak temel referans iş programının (Çizelge 5), taraflar arasında bağlayıcı nitelikte olacak

şekilde belirlenmiş olması ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı poz rayiçlerinin temel alınarak oluşturulmuş olması öngörülmektedir (Çizelge 4).

• Gecikme Analizi: Proje sürecinde herhangi bir gecikme meydana gelmesi durumunda, Windows Gecikme Analizi yöntemi kullanılacaktır. Bu analiz, süre uzatımı veya cezai işlemler ile ilgili kararların alınmasında temel teşkil edecektir.

• Hukuki Dayanak: Anlaşmazlık durumlarında Türk Borçlar Kanunu'nun ilgili hükümleri geçerli olacaktır.

İşveren, projenin gereklerine uygun çelik malzemelerini tedarik ederek yüklenicinin imalathanesine teslim etmekle yükümlüdür. Yüklenici ise bu malzemeleri sözleşmede belirtilen teknik şartnamelere ve projeye uygun şekilde işleyerek imalatını gerçekleştirecek, ardından bu elemanları şantiye sahasına montaj amacıyla sevk edecektir.

Proje sürecinde yaşanabilecek olası gecikmelerin değerlendirilmesi için kullanılan Windows Gecikme Analizi tekniği, tarafların yükümlülüklerinin ayrıştırılmasını ve gecikme kaynaklarının tespit edilmesini sağlayacaktır. Bu yöntem, aşağıdaki mühendislik gereksinimlerini karşılayarak detaylı analizler sunar;

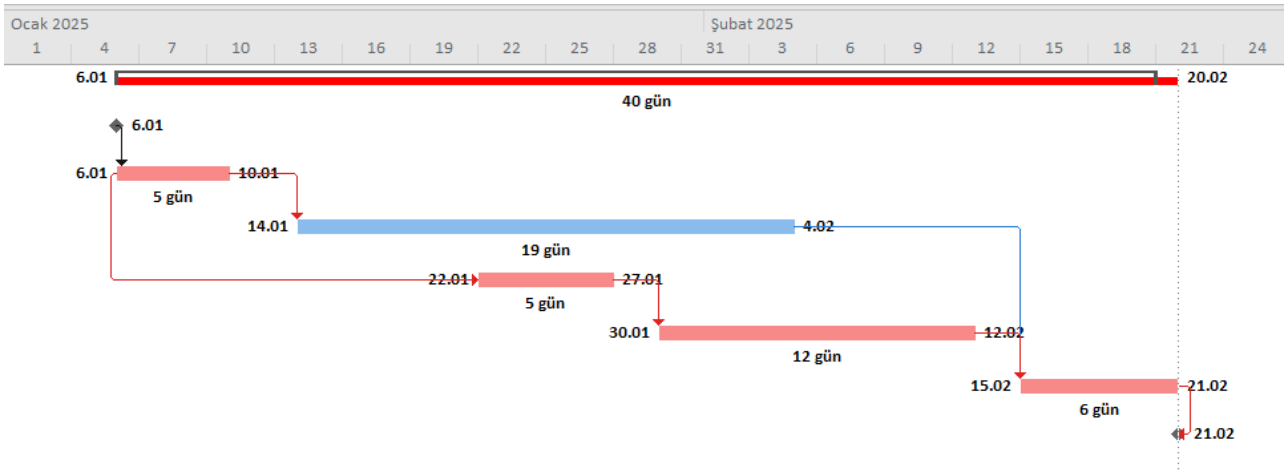
• Gecikme sebeplerinin işveren veya yüklenici kaynaklı olup olmadığının belirlenmesi,

• Gecikmenin proje takvimine etkisinin net bir şekilde hesaplanması,

• Taraflara uygulanacak cezai yaptırımların veya süre uzatımı haklarının doğru şekilde belirlenmesi.

Bu yaklaşım, proje sürecinde şeffaflığın sağlanması ve işveren ile yüklenici arasındaki olası anlaşmazlıkların teknik ve hukuki bir zeminde çözüme kavuşturulması açısından büyük önem taşımaktadır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 ve Sonrası kitabında bulunan 15.165.1003 numaralı "Her çeşit profil, çelik çubuk ve çelik saçlarla karkas, (çerçeve) inşaat yapılması, yerine tespiti (sadece işçilik rayiçleri)" pozuna dair rayiç bilgileri Çizelge 4 de verilmiştir.



Şekil 1. CPM'li iş programının GANTT Şeması Görüntüsü

5.2. Projede Gecikme Senaryoları ve Analizleri

Sözleşmemizde de belirtildiği üzere bir gecikme olduğu durumda kullanılacak gecikme analizi yöntemi Windows Gecikme Analizi olarak taraflar arasında hüküm kurulmuştu. Öncelikle Windows Gecikme Analizi tekniğinin akış adımlarını incelemek gerekirse;

i. Öncelikle sözleşme sonrası temel referans iş programı oluşturulur. (Şekil 1)
ii. Proje süresi uygun aralıklı pencerelere bölünerek iş programı daha spesifik gözlemlenir.
iii. Bölünen pencerelerdeki aktivitelerin bitiş tarihleri şantiyeden gelen raporlara göre güncellenir.
iv. Pencere içinde kalan aktiviteler için kritik yol bulunur.
v. Pencere içinde meydana gelmiş gecikmeler ve bu gecikmelerin sorumlu tarafları belirlenir.
vi. Rapor hazırlanarak ilgililere teslim edilir.

İşveren A'nın malzemeleri geç tedarik edip imalathaneye teslim etmesinden kaynaklanan gecikme, Kritik Yol Metodu ile oluşturulan iş programında kritik yol üzerindeki tüm aktivitelerin etkilenmesine neden olmuştur. Şekil 2 de görüleceği üzere 15/01/2025 tarihinde güncellenen iş programına göre, bu gecikme 4 günlük bir iş uzama süresi doğurmuş ve işin tamamlanma tarihi 26/02/2025 olarak revize edilmiştir. Diğer aktivitelerin öngörüldüğü şekilde ilerlemesi durumunda bile iş teslim süresi bu tarihe sarkmıştır.

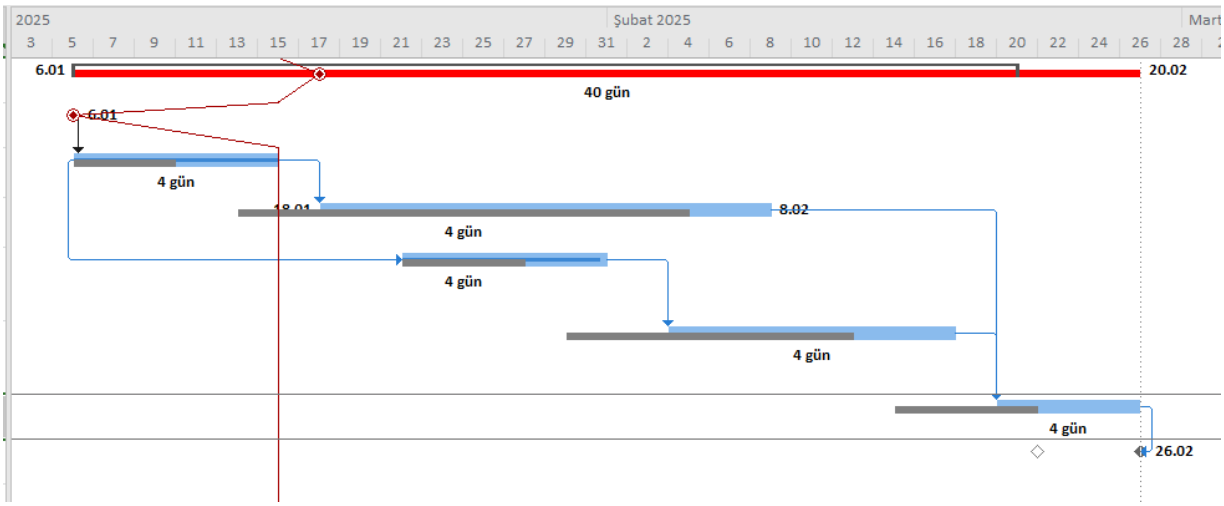
Türk Borçlar Kanunu (TBK) m.472/3 kapsamında yüklenici B'nin, işveren kaynaklı gecikmeyi resmi yollarla ve teknik analizlerle işverene bildirme yükümlülüğü bulunmaktadır. Bu kapsamda yüklenici, gecikmeyi Windows Gecikme Analizi yöntemine uygun olarak GANTT şeması üzerinde, gecikmenin meydana geldiği zaman aralığını pencere yöntemi ile ayrıştırarak raporlamalıdır. Söz konusu bildirimde kullanılacak resmi veri, malzemelerin yüklenicinin imalathanesine teslim edildiği tarihleri içeren nakliye sevk belgeleridir. Bu belgeler, gecikmenin taraflar üzerindeki etkilerinin nesnel bir şekilde analiz edilmesi ve yüklenicinin süre uzatımı hakkının korunması için kritik öneme sahiptir. Gecikmenin analizine ilişkin süreç şu şekilde detaylandırılabilir:

• Malzeme Teslim Tarihinin Tespiti: İmalathane teslim tarihi, nakliye sevk belgeleri ile doğrulanır. Bu belge, gecikmenin başlangıç noktasını belirler.

• GANTT Şeması Üzerinde Gecikme Dağılımı: Gecikmenin neden olduğu aktivitelerdeki kaymalar, CPM iş programı üzerinde yeniden hesaplanır ve GANTT şeması güncellenir.

• Windows Gecikme Analizi ile Kritik Yol Değişiklikleri: Gecikmenin kritik yol üzerindeki etkileri ayrıştırılır ve gecikmenin taraflara etkisi teknik olarak analiz edilir. Bu, süre uzatımının miktarını ve gerekçesini ortaya koyar.

• Revize İş Programı: Güncellenen iş programı, yeni kritik yol ve bitiş tarihine göre taraflar arasında yeniden değerlendirilir.



Şekil 2. İş Programının 15/01/2025 tarihli güncellenmesi

İşveren A'nın ilk parti malzemeleri geç teslim etmesi nedeniyle işin toplam süresi, sözleşmedeki 40 gün yerine 44 güne çıkmıştır. Revize edilen iş programına göre, sonraki aşamalarda ortaya çıkabilecek gecikmeler de aynı metodolojiyle analiz edilmelidir. Bu süreçte, her bir gecikmenin taraflara etkisi resmi raporlarla belgelenmeli ve yüklenicinin gecikme cezasından muaf tutulup süre uzatımı hakkını elde etmesi için gereken teknik dokümantasyon oluşturulmalıdır.

Verilen örnek haricinde onlar, yüzlerce senaryo üretilebilir. İnşaat projelerinde kendi has somut olaylar yaşandığından dolayı verilen örnekte CPM'li iş programının önemi ve ispat yükümlüsü olan yüklenici için teknik delillerin nasıl hazırlanacağı gösterilmiştir.

Bu analiz, projenin yönetiminde şeffaflık sağlamanın yanı sıra, işveren ve yüklenici arasında olası uyuşmazlıkların teknik verilere dayalı bir şekilde çözülmesine olanak tanır. Ayrıca, gecikme analizi ve dokümantasyon süreci, yüklenici için süre uzatımına ilişkin hukuki hakların korunmasında önemli bir araçtır.

6. Sonuç

İnşaat sektörü, yüksek düzeyde uzmanlık gerektiren bir alan olmasına rağmen, ülkemizde bu alandaki uzmanlaşma henüz istenilen seviyeye ulaşamamıştır. Bu eksiklik, sektörde sıkça yaşanan anlaşmazlıklar aracılığıyla kendini göstermektedir. Çalışmamız, inşaat projelerindeki bu sorunların çözümünde hukuki ve teknik yaklaşımların entegre edilmesinin önemini ortaya koymuş ve sektörde kurumsallaşma ile uzmanlaşmanın gerekliliğini vurgulamıştır.

İnşaat projelerinde yaşanan anlaşmazlıkların en aza indirilmesi ve etkin bir şekilde çözümlenebilmesi için, sözleşmelerin hazırlanmasından uygulama süreçlerine kadar her aşamanın profesyonel bir anlayışla ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, inşaat sözleşmelerinin alanında yetkin hukukçular tarafından hazırlanması ve yine uzman mühendisler tarafından teknik açıdan kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır. Böyle bir yaklaşım, yalnızca uyuşmazlıkların önlenmesine değil, aynı zamanda ortaya çıkan sorunların taraflarca adil bir şekilde çözüme

kavuşturulmasına da katkı sağlayacaktır. Bu kapsamda, inşaat firmalarının planlama mühendisi, maliyet mühendisi, hukuk departmanı ve teknik ofis mühendisliği gibi uzmanlık alanlarını içeren kurumsal bir yapıya geçiş yapması kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, Türk Borçlar Kanunu'nun (TBK) hükümleriyle inşaat projelerindeki sözleşmelerin uyum içinde olmasının, taraflar arasında belirliliği sağlamada ve proje başarısını artırmada hayati bir rol oynadığı ortaya konulmuştur. TBK'da yer alan düzenlemeler, yüklenici ile iş sahibi arasındaki hak ve yükümlülükleri adil bir şekilde dengelerken, uyuşmazlıkların çözümüne yönelik sağlam bir hukuki çerçeve sunmaktadır. Bu düzenlemeler, hem tarafların haklarını güvence altına almakta hem de projelerin zamanında ve etkili bir şekilde tamamlanmasına olanak tanımaktadır.

Süre uzatımı ve benzeri uyuşmazlıkların çözümünde, hukuki ve teknik unsurların bir arada değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Teknik değerlendirmeler, sorunların daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine katkı sağlarken, hukuki çözümler bu analizlerin uygun bir şekilde uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Bu doğrultuda hem hukuki hem de teknik uzmanlıkların proje yönetimine entegre edilmesi kaçınılmazdır. Böyle bir yaklaşım, yalnızca mevcut uyuşmazlıkların çözümünü kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekte benzer sorunların önüne geçilmesine de yardımcı olur.

Sonuç olarak, inşaat sektöründe uzmanlaşma ve kurumsallaşma süreçlerinin teşvik edilmesi gerektiği açıktır. Çalışmamız, inşaat projelerinin başarıyla tamamlanması için hem teknik hem de hukuki unsurların dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Proje yönetimi, yalnızca mühendislik ve planlama açısından değil, aynı zamanda hukuki gereklilikler doğrultusunda da ele alınmalıdır. Gelecekteki araştırmaların, proje başarısını etkileyen hukuki ve teknik unsurları daha ayrıntılı bir şekilde inceleyerek sektöre yönelik yenilikçi ve etkili çözümler geliştirmesi beklenmektedir.

Etik Beyanı
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu çalışma Dr. Öğretim Üyesi Gülçağ ALBAYRAK danışmanlığında Ahmet MERTER tarafından "İnşaat Sözleşmelerinde Süre Uzatımının Hukuki ve Teknik Olarak İncelenmesi" başlıklı ve 10615197 referans numaralı devam eden yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

7. Kaynaklar

Adhikaril, I. Kim, S., and Lee Y., 2006. Selection of appropriate schedule delay analysis method: analytical hierarchy process (AHP). P*ICMET 2006 Proceedings*, 483-488. https://doi.org/10.1109/PICMET.2006.296646

Aravindhan, C., Santhoshkumar, R., Bonny, K., Vidhya, K., Manishankar, S., and Dhamodharam, P., 2023. Delay analysis in construction project using Primavera & SPSS. *Materials Today: Proceedings*, **80**, 3171-3177.

Arditi, D., and Pattanakitchchamroon, T., 2006. Selecting a delay analysis method in resolving construction claims. *International Journal of Project Management*, **24**(2), 145-155. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.08.005

Atamer, Y., 2005, Sözleşme boşluklarının hâkim tarafından doldurulması sorununa ilişkin düşünceler, *İÜHFM C. LX1U*. S. 1-2, 174 dp.55

Ayan, S., 2008. İnşaat sözleşmesinde yüklenicinin temerrüdü, Ankara, Seçkin Yayıncılık, 99, 105 dp.59, 108, 346

Bilgetekin, N. T., 2020. İnşaat sözleşmelerinde süre uzatımı ve FIDIC sözleşmelerindeki görünümü, ISBN 978-625-7773-09-6, On İki Levha Yayıncılık, 20, 53, 198

Braimah, N., and Ndekugri, I., 2007. Factors influencing the selection of delay analysis methodologies. *International Journal of Project Management*, **26**(8), 789-799. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.001

Coşkun, M., 2017. İnşaat sözleşmelerinden kaynaklanan davalar, Ankara, Seçkin Yayıncılık, 211-212

Çevikbaş, M., 2004. İnşaat sektöründe zaman yönetimi temel kavramlar ve primavera programı ile proje planlaması örneği, 9789750289170, Seçkin Yayıncılık, 131, 133

Çevikbaş, M., and Işık, Z., 2021. An overarching review on delay analyses in construction projects, *Buildings,* **11**(3):109 https://doi.org/10.3390/buildings11030109

Çolak, E. ve Uğur, L. O., 2023. İnşaat maliyet risklerinin simülasyon yöntemi ile analizi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **11**(1):466 486 https://doi.org/10.29130/dubited.1061297

Duman, İ. H, 2024. İnşaat hukukunda makul süre, Seçkin Yayıncılık, 9789750286292, 17

Durdyev, S., and Hosseini. M. R.,2020. Causes of delays on construction projects: a comprehensive list,

International Journal of Managing Projects in Business, **13**(1), 20-46 https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2018-0178

Eggleston, Brian, 2009. Liquidated damages and extensions of time: in construction contracts, Third Edition, y.y., Wiley-Blackwell, 236, 243

Elhusseiny, H. O., Nosair, I. and Ezeldin, A. S.,,2021. Systematic processing framework for analyzing the factors of construction projects' delays in Egypt, *Ain Shams Engineering Journal*, **12**(2), 1501-1511 https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.10.016

Eren, F. 2017. Borçlar hukuku özel hükümler, 5. Bası, Ankara, Yetkin Yayıncılık, 634

Fashina, A. A., Omar, M. A., Sheikh, A. A., and Fakunle, F. F., 2021. Exploring the significant factors that influence delays in construction projects in Hargeisa. *Heliyon*, **7**(4), e06826. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06826

FIDIC Rainbow Suite ed. 2017, reprinted 2022, Red, Yellow & Silver Books, FIDIC.

Gauch, P., 1999, Le Contrat d'Entreprise, Zürich, *Schulthess Juristische Medien,* AG, 196, 204, 302

Gibson, R., 2008. Construction delays extensions of time and prolongation claims, Oxon, Taylor & Francis Publishing, 34, 145

Gökyayla, K. E., 2009. Eser sözleşmesinde ek iş ve iş değişikliği, İstanbul, Vedat Kitapçılık, 108

Gümüş, M. A., 2014. 6098 Sayılı Türk Borçlar Kanunu'na Göre Borçlar Hukuku Özel Hükümler Cilt 2 (Eser, Vekâlet, Simsarlık, Vekâletsiz İş Görme, Havale, Saklama, Kefalet ve Garanti), 3. Bası, İstanbul, Vedat Kitapçılık, 47

Kamu İhale Sözleşmeleri Kanunu, Kanun No. 4735, Resmî Gazete Tarihi: 22.01.2002

Keane, P. J, and Caletka, A. F., 2015. Delay analysis in construction contracts, 2nd Edition, John Wiley&Sons, Ltd, 6, 42, 73

Kostakoğlu, C., 2017. İçtihatlı inşaat hukuku ve kat karşılığı inşaat sözleşmeleri, 10. Bası, İstanbul, Beta Kitabevi, 240

Kurt, L. M., 2012. 6098 Sayılı Türk borçlar kanunu hükümlerine göre yüklenicinin eseri teslim borcunda temerrüdü, Ankara, Yetkin Basımevi, 115, 142-143, 167

Perera, N. A., Suteisna, M., and Yiu, T. W., 2016. Decision-making model for selecting the optimum method of delay analysis in construction projects, *Journal of Project Management in Engineering*, **32**(5), 1-14. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000441

Pickavance, K., 1997. Delay and disruption in construction contracts, London, LLP Reference Publishing, 318-319

Romzi, N. A. and Shu Ing, D., 2022. Underlying causes of construction project delay: a review, *Construction*, 07-11

Society of Construction Law: Society of Construction Law Delay and Disruption Protocol (SLC Protocol) 2nd edition, February 2017. https://www.scl.org.uk/sites/default/files/SCL_Delay_Protocol_ 2nd_Edition.pdf

Tandoğan, H., 2010a. Türk mes'uliyet hukuku (akit dışı ve akdî mes'uliyet), 1. Basıdan Tıpkı Bası, İstanbul, Vedat Kitapçılık, s.469-470.

Tandoğan, H., 2010b, Borçlar hukuku özel borç ilişkileri Cilt: II istisna (eser) ve vekâlet sözleşmeleri vekâletsiz iş görme kefalet ve garanti sözleşmeleri, Vedat Kitapçılık, İstanbul, 116-117, 911

Türk Borçlar Kanunu, Kanun No. 6098, Resmî Gazete Tarihi: 04.02.2011

Uyanık, N., 2018, YİGŞ ve FIDIC kırmızı kitap genel şartlar'a göre inşaat sözleşme yönetimi, 2.Bası, Ankara, Seçkin Yayıncılık, 176

Werz, J. C., 1994. Delay in construction contracts a comparative study of legal issues under swiss and anglo-american law, Freiburg, Universitätsverlag Freiburg Schweiz, 100, 244

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1591668
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045604 (903-915)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045604 (903-915)

Boyalı Yüzeyler Odağında Restorasyon Projelerinde Kurşun Maruziyet Riskinin Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 26.11.2024
Kabul/Accepted: 14.03.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Assessment of Lead Exposure Risk in Restoration Projects, with a Special Focus on Painted Surfaces

İbrahim Mert UZUN[1], Özge AKBOĞA KALE[2*], Damla SEZER[3]

[1] *1MEF Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*
[2] *İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye*
[3] *İstanbul Galata Üniversitesi, Sanat ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, İstanbul, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Restorasyon ve renovasyon faaliyetleri inşaat endüstrisinin bir alt bileşeni olmasına rağmen sağlık ve güvenlik riskleri bakımından yapım işlerinden farklıdır. Özellikle kimyasal risk etmenleri bakımından restorasyon projeleri yapım işlerine göre özgün risklere sahiptir. Bunun en önemli nedeni, tarihi binalarda kullanılan yapı malzemeleri ve kaplamaların zamanla ayrışması veya zarar görmesi nedeniyle tehlikeli maddelerin ortaya çıkmasıdır. Restorasyon faaliyetleri sırasında ortaya çıkabilecek asbest ve kurşun gibi maddelere maruziyet sağlık üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Asbest ve kurşuna maruziyeti önlemek ve korunma tedbirlerini belirlemek amacıyla ulusal ve uluslararası düzeyde bir dizi mevzuat bulunmaktadır. Ne var ki restorasyon projelerinde kurşun maruziyetini önlemeye yönelik yeterli araştırma ve mevzuat düzenlemesi mevcut değildir. Bu çalışmada, kurşun maruziyetinin sağlık üzerindeki etkileri detaylı şekilde açıklanmış, tarihi binalarda kurşun içermesi muhtemel yapı malzemeleri tanıtılmış ve projelerde kurşun maruziyetine neden olabilecek aktiviteler belirtilmiştir. Ayrıca restorasyon projelerinin risklerinin değerlendirmesi sürecinde dikkat edilmesi gerekenler ve risk kontrol hiyerarşisine uygun olarak kurşun maruziyetini azaltmaya yönelik koruyucu önlemler ele alınmıştır. Son olarak, İstanbul'da yer alan 19. yüzyılda yapılmış ahşap bir evin restorasyon projesinde iş tehlike analizi (JSA) yaklaşımından faydalanılarak kurşun maruziyeti risklerinin nasıl değerlendirilebileceği açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Restorasyon; Kurşun maruziyeti; Kurşunlu boya; İş sağlığı ve güvenliği; Meslek hastalığı*

Abstract

Although restoration and renovation activities are a subcomponent of the construction industry, they differ from construction works in terms of health and safety risks. Restoration projects have unique risks compared to construction works, especially in terms of chemical risk factors. The most important reason for this is the emergence of hazardous substances due to the decomposition or damage of building materials and coatings used in historical buildings over time. Exposure to substances such as asbestos and lead that may occur during restoration activities has negative effects on health. There are several legislations at national and international levels to prevent exposure to asbestos and lead and to determine protective measures. However, there is not enough research and legislation to prevent lead exposure in restoration projects. In this study, the effects of lead exposure on health are explained in detail, building materials that are likely to contain lead in historical buildings are introduced, and activities that may cause lead exposure in projects are specified. In addition, things to consider during the risk assessment process of restoration projects and protective measures to reduce lead exposure in accordance with the risk control hierarchy are discussed. Finally, it is explained how lead exposure risks can be evaluated using the job safety analysis (JSA) approach in the restoration project of a 19th century wooden house in Istanbul.

Keywords: *Restoration; Lead exposure; Lead paint; Occupational health and safety; Occupational disease*

1. Giriş

Koruma kavramı, bir kişi ya da nesneyi dış etkilerden, tehlikelerden veya sorunlu durumlardan uzak tutmak, onları zarar görmekten ve eskimekten korumak, bu süreçte gerekli dikkat ve özeni göstererek geçmişten günümüze gelen durumun olumsuz değişikliklere uğramasını engellemek amacıyla yapılan faaliyetleri içerir (Zakar ve Eyüpgiller 2015). Koruma eyleminin en temel ve geniş kapsamlı unsurlarından biri de restorasyondur. Restorasyon, hasar görerek özgünlüğünü yitirmiş ve geleceğe bütünlüğü bozulmadan aktarılamayacak yapıların, elde edilebilen en güvenilir bilgi ve belgeler ışığında, minimum müdahale ile onarılması sürecidir (Uzun vd. 2020, Gümürçinler ve Akboğa Kale 2023).

Restorasyon çalışmaları, yeni bir yapının inşasından tamamen farklı bir süreçtir. Geniş bir tanımda, restorasyon, mevcut durumda tamamı veya bir kısmı ayakta kalmış tarihi bir yapının, eldeki tüm veriler ışığında, orijinal haline sadık kalarak koruma ve onarımını sağlamayı ve en uygun müdahaleleri yapmayı içerir. Restorasyon projeleri, yeni yapı inşaatı faaliyetlerinin tümünü kapsamakla birlikte, çoğu inşaat projesinde

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Özge AKBOĞA KALE e-posta/e-mail: ozge.akbogakale@idu.edu.tr

karşılaşılması zor veya nadir olan tehlikeler de barındırır. Restorasyon projeleri, Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği Ek 1'de belirtilen listede bir yapı işi olarak tanımlanmakla birlikte klasik bir yapı işinden farklı olarak, müdahale edilen yapının eski olmasından dolayı özgün sağlık ve güvenlik risklerini içerir. Bu nedenle, tarihi bir yapının restorasyonu, kendi özgün koşulları çerçevesinde değerlendirilmelidir. Modern yapım tekniklerinden farklılık gösteren yaklaşımların kullanıldığı ve yapıdaki belirsizliklerin fazla olduğu bu projelerde iş programı oluşturmak çeşitli zorluklar taşır. Ayrıca, her tarihi yapıda dikkat edilmesi gereken birçok faktör, tarihi bir yapıda iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanmasını zorlaştırır.

Miras unsurları, zamanın baskısı altında büyük değişimlerle (malzeme yaşlanması, koruma-onarım/tahrif müdahaleleri, bozulma ve bozulma etkileri) ciddi dönemlerden geçmektedir (Sandu et al. 2019). Restorasyon çalışmalarına özgü risklerin tanımlanması bu nedenle önemlidir. Restorasyon işleri diğer yapı işlerinden farklı olarak, Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği Ek 2'de İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerini İçeren Çalışmaların Listesinde belirtildiği gibi, özel tehlikelere yönelik sağlık gözetimi gerektiren veya kimyasal ve biyolojik özelliklerinden dolayı çalışanların sağlık ve güvenlikleri için risk oluşturan maddelerle yapılan işleri içerir. Restorasyon projeleri, tarihi yapılarda bitki ve hayvanlardan kaynaklanan biyolojik riskler, yapıdaki hasar nedeniyle karşılaşılan çökme riskleri, asbest maruziyeti, yapı malzemelerinde bulunan kurşun, cıva ve kalay gibi kimyasallara maruziyet gibi kendine özgü sağlık ve güvenlik riskleri içerir. Bunun yanında yüksekten düşme, malzeme düşmesi, yangın ve ergonomi gibi risk başlıklarının da mutlaka süreç içinde dikkate alınması gerekmektedir.

Sıralanan risk etmenlerinin her biri ile mücadelede maruziyeti ve zararı yok etmek ya da kontrol altında tutmak için alınacak tedbirleri belirlemek önemlidir. Bu nedenle her bir risk etmenini detaylı olarak ele alınması ve incelenmesi sonucunda uygulanması gereken tedbirleri belirlemek hem uygulamacıların hem de çevrede bulunanların korunmasında önem arz etmektedir. Nitekim Akaydın ve Türkyılmaz (2018) yaptıkları çalışmada işlevsel dönüşüme uğramış yapıların yeni mekan tasarımlarındaki müdahaleleri irdeleyerek, insan ve insan ile ilişkili olan tüm faktörlerle ilgilenen ergonomi kavramının önemine dair çeşitli sorgulamalar yapmıştır. Çatıkkaş Karadağ (2021) ve Özgünler (2018) tarihi yapıların yangın güvenliğinin sağlanmasına ve ilgili mevzuata odaklanmışlardır. Halifeoğlu vd. (2017) Tarihi Malabadi Köprüsü'nün ana kemerinde restorasyon ve konservasyon çalışmalarını yapabilmek için üretilen çelik asma iskelenin özellikleri ve korumadaki önemi hakkında bir çalışma yürütmüştür.

Bu anlamda detaylı olarak ele alınması gereken hususlardan biri de tehlikeli kimyasal maruziyetidir. Restorasyon işleri, tarihi binaların veya alanların eski ihtişamlarına kavuşturulması sürecini içerir ve bu süreçte potansiyel olarak tehlikeli kimyasal maddelere maruz kalmak kaçınılmaz olabilir. Özellikle eski binalarda kullanılan malzemelerin ve kaplamaların zamanla ayrışması veya zarar görmesi nedeniyle, kurşun, asbest, cıva ve benzeri tehlikeli maddeler ortaya çıkabilir. Öncelikle, eski boyalarda bulunan kurşun, özellikle raspa veya yüzey hazırlığı sırasında toz haline gelerek ya da buhar olarak solunabilir ve kurşun zehirlenmesine neden olabilir. Asbest, eski yalıtım malzemelerinde ve yapı malzemelerinde bulunabilir ve bu malzemelerin kesilmesi veya sökülmesi sırasında asbest tozları ortaya çıkabilir, solunması durumunda ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Cıva içeren boyalar ise solunum yoluyla veya cilt temasıyla vücuda girebilir ve sinir sistemine zarar verebilir.

Bu tespitle yapılan çalışmada, özellikle daha önce çalışılmamış olan, tarihi yapıların restorasyon işleri kapsamında oluşan kurşun maruziyeti detaylı olarak araştırılmış, maruziyetin çalışan sağlığına etkileri değerlendirilmiş, iş tehlike analizi (JSA) kullanılarak örnek bir alan çalışması gerçekleştirilmiş ve kurşun maruziyetinin azaltılması için çözüm önerileri sunulmuştur. Araştırmanın çalışma hayatında kurşun maruziyetinin azaltılmasına katkı sağlaması ve önlemlerin belirlenmesinde yol gösterici olması beklenmektedir.

2. Kurşun Maruziyeti ve Sağlık Üzerine Etkileri

Kurşun, inşaat, madencilik ve imalat dahil olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bir metaldir (Int.Kay-1). Korozyona olan dayanımı, kolay şekillendirilmesi-işlenmesi, aşınmaya direnci, yüksek özgül ağırlığı, yüksek kaynama noktası, düşük erime noktası, enerji absorpsiyonu, kısa dalga ışınları geçirmeme özellikleri ve parlak görünümü gibi özellikleri nedeniyle de yaygın kullanım alanı bulmuştur (Tatar 2014, Int.Kay-2).

Kurşun, hava, toprak, su ve hatta evlerimizin içinde bulunabilir. Maruziyetin çoğu, geçmişte kurşunlu benzin kullanımı, bazı endüstriyel tesisler ve evlerde geçmişte kurşun bazlı boya kullanımı dahil olmak üzere fosil yakıtların kullanımı dahil olmak üzere insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Kurşun ve kurşun bileşikleri, evlerimizde ve çevresinde bulunan boya, seramik, boru ve sıhhi tesisat malzemeleri, lehimler, benzin, piller, cephane ve kozmetik ürünleri dahil olmak üzere çok çeşitli ürünlerde kullanılmıştır (Int.Kay-3).

Bunun yanında bu yaygın kullanım beraberinde meslek hastalıklarında artışa yol açmıştır. Araştırma çalışmaları, otomobil tamircisi (Goldman et al. 1987), dökümhane, akü (Baker et al. 1979), demir (Levin et al. 1997), kurşun (Todd et al. 2001) ve inşaat işçileri (Phillips 2011) gibi belirli mesleklerde yüksek düzeyde kurşun maruziyeti ve zehirlenme olduğunu ortaya koymuştur (Ji et al. 2014). Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl yaklaşık bir milyon inşaat işçisinin kurşuna maruz bilinmektedir (Int.Kay-4).

Kurşuna maruz kalma, bilinen en eski mesleki tehlikelerden biridir. ILO, kurşun ve bileşiklerine ilişkin hastalıkları "kimyasal ajanlara bağlı hastalıklar" kategorisinde meslek hastalığı olarak tanımlamaktadır (Int.Kay-5). Kurşun için mesleki maruziyet sınır değerleri ülkeler ve kurumlar arasında farklılık göstermektedir. Örneğin, Türkiye, Avustralya, İngiltere, Belçika, Almanya, İrlanda, İtalya, Singapur ve İspanya'da bu sınır değer 0,15 mg/m³ olarak belirlenmiştir. Avusturya, Fransa, Japonya, Yeni Zelanda, İsveç ve İsviçre'de ise 0,1 mg/m³'tür. Kanada, Danimarka, Polonya, Güney Kore, NIOSH, OSHA ve ACGIH gibi ülkeler ve kurumlar 0,05 mg/m³ sınırını benimserken, Letonya'da bu değer 0,005 mg/m³ olarak uygulanmaktadır (Tatar 2014). Ülkemizde Sosyal Sigortalar Kanunu Sağlık İşlemleri Tüzüğü Ek-2'de belirtilen meslek hastalıkları listesinde, kurşun ve kurşun tuzlarına bağlı hastalıklar, Kimyasal Maddelerle Olan Meslek Hastalıkları kategorisi altında A – 11 bölümünde tanımlanmaktadır. Sanayide sıkça kullanılan kurşunun başlıca maruziyet kaynakları hava, su, toprak ve toz ile yiyecek ve içecekler olarak sıralanabilir. Kurşuna mesleki maruziyetin birincil yolu solumadır. Nispeten çözünmeyen kurşun formları bile alveoller yoluyla emilebilir (Cantarow and Trumper 1944) . Bunun yanında kurşuna mesleki maruziyet, kontamine deri, giysi ve yüzeylerden de kaynaklanabilir (Int.Kay-6). Kurşunun partikül boyutu, maddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kişinin yaşı, fizyolojik durumu, beslenme ve hijyen alışkanlıkları gibi özellikleri kurşunun solunum ve sindirim sistemi yoluyla vücuda girmesinde önemli etkiye sahiptir (Civelek 2001).

Kurşuna maruziyet sonrası kurşun zehirlenmesi, kimyasalların neden olduğu meslek hastalıklarında önemli yer tutmaktadır (Int.Kay-7). Kısa süreli bir maruziyette dahi şayet maruziyet düzeyi yüksek ise, akut zehirlenmeye neden olabilir ve akut zehirlenmenin semptomları arasında ağızda metalik bir tat ve kusma, karın krampları, kabızlık ve ishal bulunur (Int.Kay-8). Ancak kronik zehirlenme belirtileri, diğer birçok yaygın şikayete çok benzediğinden, fark edilmesi daha zordur. Kronik zehirlenmenin karakteristik semptomları arasında diş etlerinde mavi bir çizgi ve "bilek düşüklüğü" yer alır. Devam eden yaygın kullanımı bir sağlık sorunudur çünkü kurşun, idrar, sinir, kardiyovasküler, iskelet, bağışıklık, gastrointestinal ve üreme sistemleri dahil olmak üzere çoklu organ sistemleri üzerinde olumsuz sağlık etkileri ile ilişkilendirilmiştir (Int.Kay-8, Int.Kay-9). Çocuklarda kurşun maruziyeti sinir sisteminin gelişimine müdahale ederek potansiyel olarak kalıcı öğrenme ve davranış bozukluklarına neden olduğundan, kurşun çocuklar için özellikle toksiktir. Çocuklar/gençler, kronik maruziyetin ardından iskeletsel değişikliklere maruz kalabilirler. Ayrıca üreme çağındaki kadınların, doğurganlığı etkileyebileceği ve ölü doğum ve düşük yapma riskini artırabileceği için kurşun maruziyetinden kaynaklanan hasar riski daha yüksektir (Int.Kay-8).

Kurşuna maruziyeti önlemek ve korunma tedbirlerini belirlemek amacıyla ulusal ve uluslararası düzeyde bir dizi mevzuat bulunmaktadır. Bu düzenlemeler genellikle kurşunlu malzemelerin üretimi, kullanımı, taşınması, bertaraf edilmesi ve işyerlerinde çalışanların korunması gibi konuları kapsar. Ulusal ve uluslararası düzeydeki bazı önemli mevzuat düzenlemeleri şu şekildedir:

Ulusal Düzeyde; Türkiye'de, iş sağlığı ve güvenliği konularını düzenleyen mevzuat arasında "İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu" ve "Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması Hakkında Yönetmelik" bulunmaktadır. Bu düzenlemeler, kurşuna maruziyeti en aza indirmek için çeşitli önlemleri içermektedir. Ayrıca maruziyetin önüne geçilebilmesi için, 28733 Sayılı "Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik" Ek 2'sinde, biyolojik sınır değerler ve sağlık gözetimi önlemleri başlığı altında sınır değerler belirtilmiştir (Int.Kay-7). İlgili yönetmeliğe göre kurşun ve iyonik kurşun bileşikleri için belirlenen sınır değerler, biyolojik izleme yönetimi ve tıbbi gözetim koşulları Çizelge 1'de gibidir.

Çizelge 1. Kurşun ve iyonik kurşun bileşikleri için mevzuat gereklilikleri

Konu	Açıklama
Biyolojik İzleme Yöntemi	Absorbsiyon spektrometri veya eşdeğer bir yöntemle kan kurşun seviyesi (PbB) ölçülür.
Bağlayıcı Biyolojik Sınır Değeri	70 µg Pb/100 ml kan
Tıbbi Gözetim Gereklilikleri	Durum 1: Havadaki kurşunun zaman ağırlıklı ortalama konsantrasyonu (haftada 40 saat çalışma esas alınarak) 0.075 mg/m³'ten fazlaysa.
	Durum 2: Çalışanlardan herhangi birinin kanındaki kurşun seviyesi 40 µg Pb/100 ml kandan fazlaysa.

Uluslararası düzeyde; AB'de "Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması" (REACH) düzenlemesi, kimyasal maddelerin güvenli bir şekilde kullanımını ve insan sağlığını korumayı amaçlar. Kurşun içeren maddeler de bu düzenleme kapsamında değerlendirilir ve düzenlemeye tabi olabilir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde(ABD) İş Sağlığı ve İş Güvenliği İdaresi, işyerlerinde çalışanların sağlığını korumak amacıyla çeşitli standartlar belirler. "Kurşun ile İlgili İş Sağlığı ve Güvenliği Standartları" (OSHA Lead Standards) bu çerçevede kurşuna maruziyeti düzenler.

Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO), işçi hakları ve iş sağlığı güvenliği konularında uluslararası standartlar belirler. "Tehlikeli Maddelerin Kullanılmasıyla İlgili (ILO 170) Anlaşma" ve "Kimyasal Ajanlarla İlgili ILO Anlaşması" gibi belgeler, işyerlerinde zararlı kimyasal maddelere karşı korunma önlemlerini içerir.

Bu düzenlemeler, kurşuna maruziyeti azaltmak ve çalışanları korumak amacıyla çeşitli standartları ve yönergeleri içerir. İşyerlerinin, bu mevzuatlara uymak ve gerekli önlemleri almak için ilgili kuralları izlemesi önemlidir.

3. Tarihi Eserlerde Kurşun ve Kurşun Maruziyetine Neden Olan Faaliyetler

Kurşunun sağlık üzerindeki etkilerinin yeterince araştırılmadığı eski dönemlerde faydaları gözetilerek birçok yapı elemanında kurşun kullanılmıştır. En yaygın örnekler boyalar, sıva ve harçlar, kaplamalar ve süslemelerde kullanılmasıdır. Bu nedenle tarihi yapılarda kimyasal bir risk etmeni olarak kurşunun varlığını tespit etmek önemlidir. Aşağıda tarihi yapılarda kurşun ihtiva edebilecek çeşitli yapı malzemeleri tariflenmiştir.

- Duvar Boyaları: Tarihi binaların iç ve dış duvarlarında, özellikle eski boyalar (1970'li yıllardan önce uygulanan macun ve boyalar)
- Tavan Kaplamaları: Tarihi binaların tavanlarında kurşun içeren kaplamalar veya dekoratif süslemeler
- Sıva ve Harç: Duvar sıvalarında veya restorasyon sırasında kullanılan sıva malzemelerinde
- Pencereler ve Kapılar: Pencere çerçeveleri (kompozit döküm süslemelerinde kullanılan üstübeç ve pigmentler), kapı çerçeveleri ve kapı kollarının bazı bölgelerinde
- Camlar: Eski pencerelerin veya vitray camların kurşun cıvatalarla sabitlendiği dönemlere ait yapılarda, camlarla temas eden bölgelerde
- Döşemeler ve Zeminler: Zemin kaplamaları veya döşemelerde, özellikle ahşap döşemelerde kurşun bazlı vernikler veya cilalar varsa
- Çatı Kaplamaları ve Oluklar: Tarihi binaların çatı kaplamaları veya yağmur olukları
- Tesisat: Eski binalarda su boruları ve diğer tesisat malzemeleri
- Duvar Kaplamaları: Bazı tarihi binalarda, duvar kaplamaları veya sıvalarında
- Çerçeveler ve Dekoratif Detaylar: Tarihi binaların iç ve dış dekorasyonunda, çerçevelerde ve diğer dekoratif detaylarda
- Süslemeler ve Heykeller: Tarihi binaların dış cephesinde veya iç mekanlarında süslemelerde veya heykellerde
- Çatı Harf ve Rakamları: Tarihi binaların çatılarında bulunan harf ve rakamlarda

Restorasyon işlerinde çalışan işçiler, uzun yıllar boyunca özellikle kurşun ve kalay gibi ağır metallere maruziyet nedeniyle kurşun zehirlenmelerine ve uzun vadede ciddi hastalıklara yakalanma riski taşımaktadır (Özbolat ve Tuli 2016). Nitekim, Tabak ve Büyükakıncı (2023) anıtsal yapıların çatıları genellikle kurşun levhalarla kaplı olduğundan, cami veya kilise gibi bir yapının yanması gibi bir durumda kimyasal risk oluşabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde Gürcanlı vd. (2022) inceledikleri Sadabad Camii'nin restorasyon projesi kapsamında birçok parçada kurşun kullanımı olduğunu tespit etmiş ve kurşun maruziyetinden kaynaklanan sağlık risklerine vurguda bulunmuştur.

Bu maddeye maruziyet yalnızca projelerde çalışan işçiler bakımından değil halk sağlığı bakımından da önemlidir. Paris'te bulunan Notre Dame Katedrali'nde 2019 yılında çıkan yangın buna örnektir. Yangın sonrasında, katedralin çatısında bulunan 300 tona yakın kurşun malzeme tamamen erimiş ve kurşun partikülleri havaya karışmıştır. Yangından iki ay sonra Paris merkezinde bir çocuğun kanında normal sınırların üzerinde kurşun tespit edilmesi üzerine ise halk sağlığı için özel önlemler alınması tavsiye edilmiştir (Int.Kay-10). Öte yandan, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1978' de federal hükümet, tüketicilerin kurşun bazlı boya kullanımını yasaklamıştır. Bu nedenle ABD'de 1978'den önce üretilmiş binalarda kurşun bazlı boya kullanıldığı kabul edilerek renovasyon çalışmalarında önlemler alınması istenmektedir.

Ülkemizde anıtsal yapılarının restorasyonunda "kalemkar" olarak çalışan ve üstüne boyamaların raspa edilmesinde görev alan restoratörlerde kanda kurşun değerleri oldukça yüksek tespit edilmiştir. Benzer bir şekilde ısı tabancaları kullanılarak ahşap boyalı yüzeyleri raspa eden marangoz, boyacı ve restoratörlerde kanda yüksek kurşun oranları tespit edilmektedir. Özel Medivia

Hospital Hastanesi Laboratuvarında 01.04.2019 tarihinde yaklaşık 1 yıl süre boyunca boya raspasında görevlendirilen 25 yaşındaki kadın restoratörün kanda kurşun oranı 28,5 mg/dL olarak ölçülmüştür. Benzer bir biçimde boya raspasında görevlendirilen bir kalemkarın Süreyyapaşa Eğitim ve Araştırma Hastanesi'nde 22.03.2019 tarihli 1809 numaralı Mesleki Sağlık Kurulu Raporunda kanda kurşun oranının 51,1 mg/dL olduğu belirtilmiş ve kişi hastaneye tedavi için yatılırmıştır. Ancak, ülkemizdeki yönetmeliklerde yapılardan gelen kurşun zehirlenmeleri üzerine çok durulmadığından, konu iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde yer almamaktadır.

Restorasyon projelerinde kurşun maruziyetine neden olacak, çalışma ortamında solunabilir ya da yutulabilir kurşun partikülleri oluşumunu tetikleyen faaliyetler şunlardır:

- Kurşun içeren boyaların ve yüzey kaplamalarıyla çalışma (üstüne boyamaların kaldırılması/raspa edilmesi),
- Yıkım, onarım, kaynak, kesme, yakma, uygulama (örneğin, kazıma, zımparalama, kumlama, ısı tabancası vb.)
- Kurşun ürünlerin takılması veya çıkarılması (kurşun paneller, kurşun kaplama ve kurşun tuğlalar gibi)
- Kurşun dökülmesi, kurşun içeren boyaların veya diğer kurşun içeren ürünlerin püskürtülmesi,
- Kurşun içeren kaplamaların kumlama, yakma vb. yöntemler kullanılarak çıkarılması,
- Kurşun içeren kaplamaların kaynak işlemi yapılması ya da oksijen kaynağı ile kesilmesi,
- Kurşun, kurşun alaşımı veya kurşun içeren kaplamaların kumlama gibi mekanik yöntemlerle ya da termal olarak işlenmesi,
- Kurşun içeren malzemelerle çatı kaplamaları yapılması,
- Boyama cam, kalaylama işleri,
- Kurşun içeren harcın çıkarılması,

Kurşuna maruz kalma riski en yüksek olan işçiler arasında demir işleri, inşaat, yıkım, boyama, sıhhi tesisat, kaynak, ısıtma ve iklimlendirme, bina bakım/ onarım ve restorasyonu, elektrik, marangozluk, yenileme ve tadilat ile uğraşanlar bulunur (Int.Kay-11).

4. Yöntem

Restorasyon ve renovasyon projelerinde sağlık ve güvenlik risklerinin yönetimi, projelerin başarısı için kritik bir öneme sahiptir. Bu tür projelerde karşılaşılan risklerin doğru bir şekilde analiz edilmesi ve yönetilmesi, hem çalışan sağlığını korumak hem de proje maliyetlerini ve zaman kayıplarını minimize etmek için hayati bir gerekliliktir. Özellikle kimyasal risk faktörlerinin tespiti ve değerlendirilmesi, restorasyon projelerinin kendine özgü doğası nedeniyle özel bir yaklaşım gerektirir.

Bu çalışmada, risk değerlendirme süreçleri çerçevesinde kurşun maruziyetinin etkilerini minimize etmeye yönelik bir metodoloji sunulmuştur. Metodolojinin temel adımları, tehlikelerin belirlenmesi, risklerin analizi, değerlendirilmesi ve uygun kontrol önlemlerinin belirlenmesi olarak dört ana başlık altında yapılandırılmıştır. Aşağıda, bu adımları içeren yöntem detaylı şekilde açıklanmaktadır.

Risk değerlendirmesi yasal bir zorunluluk olarak, tüm faaliyetlerde olduğu gibi restorasyon ve renovasyon projelerinde de çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlamak için anahtar bir rol üstlenir. Risk değerlendirmesi aşamaları birçok standart ve rehberde birbirine benzer adımların tarif edildiği aşamalı bir süreçtir (Şekil 1).

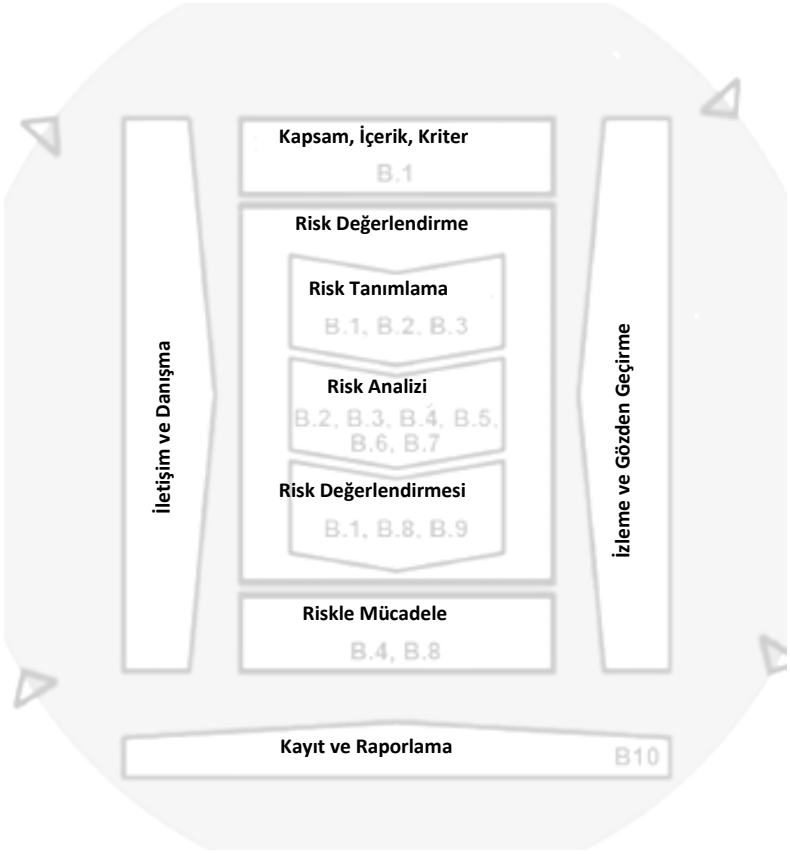
Adım 1. Risklerin Belirlenmesi

Restorasyon projeleri genel olarak belgeleme ve araştırma, kapsamın tanımlanması ve tasarım ve uygulama safhalarından oluşmaktadır. Bu safhalardan ilki olan belgeleme ve araştırma safhası yapının mimari çizim ve görsel olarak belgelenmesinin yanı sıra yapıda kullanılan malzemelerin ve yapım tekniklerin tespitini de içermektedir. Bu aşamada potansiyel kurşun kaynakları işaretlenerek özel bir titizlikle araştırılmalıdır. Laboratuvar analizleri ya da yerinde yapılan bazı testler için olanak mevcut değilse, 1970'li yıllardan önce uygulanan tüm boyalar ve macunlar kurşun içerikli olarak kabul edilmelidir. Zira belirtilen dönemlerdeki macunlarda ve boyalarda kurşun beyazı (kurşun karbonat ya da kurşun sülfat) olan üstübeç kullanıldığı bilinmektedir. Bu aşamada haritalama yolu ile projeler üzerinde gösterilen malzeme ve yapım tekniklerine "kurşun içeren malzemeler" başlığı ile tüm kurşun kaynakları proje üzerinde işaretlenmelidir.

Kapsam tanımlaması ve tasarım yapılırken, sadece yapının son konsept tasarımı değil, uygulama metodolojisi de tasarlanmalıdır (Int.Kay-12). Örneğin, boya raspası öngörüldüğü durumda bu raspanın hangi yöntemle yapılacağı (mekanik ya da kimyasal) yazılmalı ve bu yönteme uygun koruyucu yöntemler tasarım aşamasında tarif edilmelidir.

Kurşun maruziyetine odaklanan bir risk değerlendirmesinde öncelik "tehlikenin tanımlanması" yani "kurşun içerikli malzeme ve aktivitelerin" analiz edilmesidir. Bunun için öncelikle "Preliminary Hazard Analysis (Ön Tehlike Analizi)" yaklaşımından faydalanılarak, konservasyon yaklaşımı belirlenmeden

önce malzeme analizi yapılmalıdır. Bu malzeme analizi, kurşun ihtiva edebilecek yapı elemanlarının/envanterin bir listesini içermeli ve kurşunun laboratuvar testine tabi tutulup tutulmayacağını göstermelidir. Kurşun içerikli boyanın bir yapıda bulunabileceği yerler ile ilgili yapılabilecek bazı kontroller ile ilgili "Construction Industry Training Board" tarafından hazırlanan ve kısa bir bölümü aşağıda sunulan Çizelge 2 fikir verebilir. Çizelge 2'de görüleceği üzere tarihi yapıdaki temel bazı malzemeler, bu malzemelerin konumu, kurşun içerip içermedikleri ile ilgili kontroller ve varsa kurşun miktarı belirlenmelidir. Bu bilgiler ilgili yapı malzemesi üzerinde yapılacak çalışmalar (örneğin raspa, kumlama vd.) esnasında ortaya çıkabilecek kurşun maruziyeti riskinin şiddetini ve olasılığını öngörmek için önemli bilgilerdir.



Şekil 1. Risk değerlendirme aşamaları (Int.Kay-13)

Adım 2. Risklerin Analizi

Malzeme analizinin gerçekleştirilmesinin ardından düşünülmesi gereken bir diğer önemli husus bu malzemeler üzerinde yapılacak çalışmaların nasıl kurşun partikülleri ortaya çıkaracağının tespit edilmesidir. Yani tehlike kaynağı olan malzeme ile çalışma nedeni ile ortaya çıkacak riskler belirlenmelidir. Bunun için kurşun riski doğurabilecek aktiviteler belirlenmelidir. Tehlikelerin belirlenmesi adımındaki yaklaşıma benzer olarak bu kez, kurşun ihtiva eden yapı malzemelerinin bulunduğu aktiviteler de değerlendirilmelidir. Daha önce belirtildiği üzere kurşunun çalışanların üzerinde olumsuz sağlık etkileri yaratması için soluma, cilt teması ya da yeme-içme gibi maruziyet yollarının oluşması gerekir. Bu ise ancak kurşun içerikli malzemeler üzerindeki raspa, sökme-takma vd. faaliyetler nedeniyle oluşabilir. Kurşun maruziyetini oluşturan aktiviteler ve yarattığı maruziyet yollarından bazıları şöyle örneklenebilir:

- Duvar ya da macun boyasında bulunan kurşun, mekanik raspa işlemi yaparken toz partiküllerinin ortam havasına karışması ve solunması yoluyla sağlığa zarar verebilir.
- Ahşap kapı, doğrama ve süsleme elemanlarında ısı tabancası ile yapılan raspa işlemlerinde macun ve boyalardaki kurşun, ısınma ve sonrasındaki buharlaşma sonrasında ortaya çıkabilir.
- Kurşun kaplama elemanların sökme ve takma işlemleri esnasında kurşun partikülleri ortaya çıkabilir. Bunlar çoğunlukla elle taşıma işlemlerini içerdiği için cilt temasına neden olabilir.
- Kenetlerin kurşun dökme işlemleri esnasında ergimiş kurşunun buharının ortama yayılması sonucu maruziyet oluşabilir.

Çizelge 2. Tarihi yapılarda kurşun envanter analizi

Tehlike konumu		Konum referansı						
		Kurşun kontrolü?		Kurşun tehlikesi?		Laboratuvar kontrolü?		
Tarif	Referans	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Kurşun miktarı
Duvar								
Süpürgelikler								
Kaplama								
Pencereler								
Eşikler								
Panjur								
Kapı								
Çerçeve								
Astar								
Çeşitli Malzemeler								
Erişim kapakları								
Çatı erişimi/tavan boşlukları								
Takılı bileşenler								
Şömine çevreleri								
Tank/kazan gövdeleri								

Adım 3. Risklerin Değerlendirilmesi

Restorasyon aktiviteleri ve kurşun maruziyeti arasındaki ilişki risk analizi adımında tariflenmiştir. Kurşuna maruz kalma yolu, aktivitenin türüne göre değişkenlik göstermektedir. Çoğunlukla restorasyon faaliyetinde tercih edilen yapım yöntemi, kurşun partiküllerinin ortama yayılmasına neden olur. Solunabilir nitelikteki kurşun (toz ya da buhar) yeterli havalandırma ve kişisel korunma yöntemleri kullanılmadığı durumlarda daha büyük riskler yaratır. Açık alanlar ile kapalı alanlarda çalışma ortamında bulunan kurşun konsantrasyonu birbirinden farklı olacaktır. Bu durum kurşun kaynaklı risklerin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir.

Kurşun maruziyetinden kaynaklı risklerin değerlendirilmesi için literatürde tanımlı bir risk değerlendirme yöntemi mevcut değildir. Birbirinden farklı risk değerlendirme yöntemleri kurşun maruziyeti risklerinin değerlendirmesi için avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Hangi yöntem tercih edilirse edilsin risk değerlendirmesinin bu adımında amaçlanan öncelikli risklerin belirlenmesidir.

Kurşun maruziyetine neden olan aktiviteler tanımlandıktan sonra JSA (Job Safety Analysis-İş Tehlike Analizi) yaklaşımından yararlanılarak risk değerlendirmesi yapılabilir. Çalışan, görev, araç ve işyeri ortamı arasındaki karşılıklı ilişkiye odaklanan JSA, her bir iş kalemindeki tehlikeleri ortaya çıkmadan önce tanımlamayı ve riskleri tamamen ortadan kaldırmak veya kabul edilebilir seviyelere indirmek için çözümler üretmeyi amaçlar (Int.Kay-14). İdeal olan, kontrol edilemeyen tehlikeleri tanımladıktan sonra bu tehlikeleri tamamen ortadan kaldırmak veya risklerini kabul edilebilir seviyelere indirmek için işi alt sınıflara ayırmaktır (Chao and Henshaw 2002). JSA hemen hemen tüm meslek gruplarına uyarlanabilir. Ancak ekonomik ve etkin çıktılar elde etmek için tekrarlanan süreçlerin baskın olduğu endüstri kolları daha çok tercih edilmektedir (Rausand 2005). Bu yöntemin en önemli avantajı, yöntemin tamamen kişisel değerlendirmelere dayanmaması ve tehlike analizinin işin kendisiyle eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesidir (Akboğa 2011, Akboğa ve Baradan 2017).

Adım 4. Kontrol Önlemlerinin Belirlenmesi

Kurşunun yutulmasını, solunmasını ve transferini önlemek için, risk kontrol hiyerarşisine uygun olarak önlemlerin alınması gerekir. Risk kontrol hiyerarşisi temel olarak aşağıdaki adımları içerir:

- Eliminasyon
- İkame
- Mühendislik kontrolleri
- İş ve hijyen uygulamaları
- Koruyucu giysi ve ekipman

Kurşunu kontrol etmek için yukarıda belirtilen önlemlerin biri ya da birkaçı birlikte uygulansa dahi çalışanlar kurşun maruziyeti ile karşılaşılabilir. Bu nedenle, periyodik tıbbi muayeneler ile işçilerin kurşun maruziyetinin etkilerinden mustarip olup olmadıklarını belirlemek önemlidir. Risk kontrol hiyerarşisi uyarınca kurşun maruziyetinden korunmak için alınabilecek önlemler şu şekildedir:

- Kurşun içerikli elemanların yapıdan çıkarılması ve uzaklaştırılması restorasyon prensipleri gereği mümkün olmayabilir.

● Kurşun içeren boyaları, kaplamaları ve malzemelerin kurşunsuz ürünlerle değiştirilmesi restorasyonda önerilemez. Dahası kurşunlu pigment içeren boya türü önemlidir. Yağlı boya ya da tutkallı boyalar daha sorunsuz olmakla beraber tozumanın fazla olduğu kireçli badanalarda sorun daha büyük olabilir. Bu konuda uygun koruyucular kullanılarak konservasyon önlemleri alınabilir.

● Toz oluşumunu azaltacak kurşun içeren ürünlerin çıkarılması veya takılması için yöntemler ve ekipmanların seçilmesi (örneğin, ıslak süpürme, HEPA filtreli vakumlu süpürge vb. yöntemler) sağlanabilir.

● Boya raspası sırasında raspa yöntemine uygun ekipman ve koruyucu giysilerin seçilmesi tercih edilebilir. (Çizelge 3)

● Kirleticileri kaynağında gidermek için lokal mekanik havalandırma sağlanmalıdır. Örneğin, kurşun içeren toz üretebilen elektrikli aletler etkili toz toplama sistemleri ile donatılmalıdır. Kirlenmiş havayı işyerinden uzaklaştırmak için genel mekanik havalandırma sağlanmalı ve egzoz havasını değiştirmek için filtrelenmiş hava sağlanmalıdır.

● İşçiler her vardiyanın sonunda yıkanabilmeli ve duş alabilmelidir. Kullanılan kıyafetler evde değil işyerinde yıkanmalı ya da kullan-at olmalıdır. Kurşuna maruz kalmayı içeren tüm çalışmalar için, kontamine alanlarda sigara içmek, yemek içmek yasaklanmış olmalıdır. Yiyecek ve içecekler kirlenmemiş bir alanda saklanmalıdır.

● Etkili bir temizlik programı, kurşun içeren toz ve kalıntıların düzenli olarak temizlenmesini ve uzaklaştırılmasını gerektirir. Yüksek verimli partikül hava (HEPA) filtresi ile donatılmış bir vakumla vakumlanarak temiz tutulmalıdır. Kurşun içeren atık kapları, tozun havaya karışmasını önlemek için sıkıca örtülmelidir. Basınçlı hava veya kuru süpürme ile temizlemeden kaçınılmalıdır.

● Cilt kontaminasyonunu önlemek için uygun kişisel koruyucu giysi ve ekipmanlar kullanılmalıdır. Bu ekipmanlar şunları içerir ancak bunlarla sınırlı değildir: tulumlar veya tam vücut iş kıyafetleri, eldivenler, şapkalar, ayakkabılar veya tek kullanımlık örtüler ve güvenlik gözlükleri, yüz siperlikleri veya gözlükler.

● Solunum cihazları, mühendislik kontrollerinin ve iş uygulamalarının kurşun konsantrasyonunu mesleki maruziyet sınırının altına düşürmediği durumlarda kurşunun solunmasını önler. İşçiler, kullanmadan önce kişisel koruyucu ekipmanların bakımı ve kullanımı konusunda bilgilendirilmeli ve eğitilmelidir.

● Solunum maskeleri kullanılıyorsa, kişisel koruyucu ekipman programının bir parçası olarak bir solunum cihazı programı uygulanmalıdır. Solunum cihazlarının sağlandığı yerlerde, beklenen havadaki kurşun konsantrasyonları için uygun koşullar altında olmalıdırlar. Solunum maskeleri, NIOSH tarafından atanan koruma faktörlerine göre seçilmelidir.

● Çalışanların kurşuna maruz kalıp kalmadıklarını anlamak için düzenli aralıklarla sağlık tetkikleri yenilenmelidir. Kurşun içeren faaliyetlerde çalışanların sağlık durumları işyeri hekimi tarafından yakından izlenmeli, şüpheli bir durumda alınan önlemler gözden geçirilmeli ve çalışanın kurşuna maruziyeti engellenmelidir.

5. Saha Araştırması Bulguları

Kurşun riskinin bir restorasyon projesinde nasıl değerlendirilebileceği ile ilgili yapılan saha araştırmasında İstanbul Bebek'te 19. Yüzyıla tarihlenen kâgir bodrum ve zemin kat üzerinde yükselen ahşap konstrüksiyonlu bir evde yürütülecek faaliyetler ele alınmıştır (Resim 1). Tarihi evin birçok bölümündeki boya katmanlarını tespit etmek üzere araştırmalar ve mikroskop görüntülemeleri yapılmıştır. Bu araştırmalar, 19. yüzyıl sonu ve 20. yüzyıl başından kalan boya katmanlarının varlığını göstermiştir (Resim 2). Boyanın yaşlanma morfolojisinden (timsah derisine benzer kılcal çatlaklar ve tozuyarak dökülme) bağlayıcının beziryağ olduğu ve 1970 öncesinde kullanılan bir boya olduğu anlaşılmaktadır. Bu katmanlardaki boyaların laboratuvar analizine gerek kalmaksızın üstübeç (kurşun karbonat) içerdiği söylenebilir. (Acar 2017) Bu nedenle boya katmanları araştırmaları sonucunda kurşun içeren boyaların kullanıldığı tespit edilen tüm mimari elemanlarda öncelikle envanter analizi gerçekleştirilmiştir. Envanter analizini takiben kurşun maruziyetine neden olacak aktiviteler tanımlanmıştır. Tanımlanan her bir aktivite, inşaat aktivitelerindeki riskleri değerlendirme için avantajlar sunan JSA (Job Safety Analysis-İş Tehlike Analizi) yaklaşımından yararlanılmıştır. JSA, yürütülecek aktiviteyi adımlarına ayırıp her bir adımda karşı karşıya kalınacak riskleri belirlemek için fayda sağlar. Zira, kurşun maruziyeti bir restorasyon aktivitesinin bütününde değil, bir alt aktivitesinde de ortaya çıkabilir.

Örneğin dış cephe işlerinde, kurşun maruziyeti dışında yüksekte çalışma, elle kaldırma gibi farklı riskler de mevcuttur. Ancak kurşun maruziyeti dış cephenin boyasının kaldırılması esnasında ortaya çıkacaktır. Bunun için her bir ana restorasyon aktivitesinin alt aktivitesinde kurşun maruziyetine neden olacak hususlar belirlenmiştir. Bunun için öncelikle kurşun içeren yapı malzemeleri, kurşunun partiküllerini ortaya çıkaracak alt aktivite, maruziyet türü, maruziyet seviyesi ve alınması gereken

önlemler Çizelge 4'te tarif edilmiştir. Restorasyon projesinde, her bir aktivite için JSA formlarında Çizelge 2 ve 3'den faydalanılarak riskler değerlendirilmiştir. Buna göre öncelikle aktiviteler iş adımlarına ayrılmış ve Çizelge 4'te belirtilen alt aktivite adımlarında belirtilen önlemlerin alınması önerilmiştir.

Çizelge 3. Kurşunlu boya ve macunların raspa edilmesi sırasında kontrol önlemleri

	İşin türü	Yanlış Uygulama	Doğru Uygulama	Alınması Gereken Önlemler
A	Boyalı ahşap yüzeylerden boya raspası			● Kurşunu buharlaştırmadan 200°C altında ısı veren kızılötesi ısıtıcı ile boya raspası yapılmalıdır. Isı tabancası kullanılmamalıdır. ● Solvent buharını temizleyen filtreler içeren maske kullanılmalıdır. ● Eldiven, kolları kapalı, önü kapalı iş giysileri giyilmeli.
B	Sıvalı yüzeylerde muhdes boya katmanlarının hassas mekanik raspa ile alınması			● Solvent buharını temizleyen ve 5 mikron boyutundaki tozları geçirmeyen filtreler içeren maske kullanılmalıdır. ● Eldiven, kolları kapalı, önü kapalı iş giysileri giyilmeli. Mümkünse her gün atılacak, tek kullanımlık tulum giyilmelidir. ● Gözleri tozdan koruyacak gözlük ve saçın arasında kurşun tozunun birikimini engelleyecek şekilde saç bölgesi örtülmelidir. Gözlük her gün yıkanmalı, saç örtüsü de mümkünse kullan at olmalıdır. ● Çalışma mahalinde telefon, içme suyu, bardak gibi objeler bulunmamalıdır. Kurşun tozu bunlarda birikir.

Resim 1. Örnek saha araştırması yapılan İstanbul Bebek'teki ahşap köşkün güney cephesi

Resim 2. Pencere silmesinde ve ahşap cephede tespit edilen beziryağlı boyalı yüzeyler ve bu yüzeylerin dijital mikroskop altındaki görüntüsü.

Çizelge 4. Tarihi Bir Yapıdaki Restorasyon Faaliyetlerinde Kurşun Maruziyeti Risk Değerlendirmesi

No	Envanter Foto	Kurşunlu Yapı Malzemesi	Restorasyon Alt Aktivitesi ve Maruziyet Şekli	Etkilenecek Kişiler	Alınması Gereken Önlemler
1		Ahşap kapılarda kurşunlu macun ve boyalar	Boya sökümü sırasında kurşun tozuna ya da kurşun buharına maruziyet	Marangoz, restoratör	**Çizelge 3, A** satırında tarif edilmiştir.
2		Ahşap kaplamalı tavanlarda kurşunlu macunlar ve boyalar	Boya sökümü sırasında kurşun tozuna ya da kurşun buharına maruziyet	Marangoz, restoratör	**Çizelge 3, A** satırında tarif edilmiştir.
3		Sıvalı duvarlarda kurşunlu boyalar	Boya raspası sırasında kurşun tozuna maruziyet	Restoratör, boyacı	**Çizelge 3, B** satırında tarif edilmiştir.
4		Muhdes sıvalı duvarlar Duvarlara monte edilen muhdes elemanlar	Muhdes duvarların ve elemanların sökümü /yıkımı sırasında kurşunlu boyalardan yayılan kurşun tozuna maruziyet	İnşaat ustası, İnşaat işçisi, restoratör	**Çizelge 3, B** satırında tarif edilmiştir.
5		Ahşap cephe kaplaması üzerinde kurşunlu boyalar	Boya raspası sırasında kurşun tozuna maruziyet Cephe kaplamaları sökümü sırasında kurşun tozuna maruziyet	Boyacı, marangoz, inşaat işçisi, Restoratör	Boya raspası sırasında **Çizelge 3, A** satırında tarif edilen önlemler alınmalıdır. Cephe kaplamaların sökümü sırasında **Çizelge 3, B'**deki önlemler alınmalıdır.
6		Ahşap merdiven basamak ve korkulukları üzerinde kurşunlu boyalar	Boya raspası sırasında kurşun tozuna ya da kurşun buharına maruziyet. Basamak ve korkulukların sökümü sırasında kurşun tozuna maruziyet.	Boyacı, marangoz, inşaat işçisi, Restoratör	Boya raspası sırasında **Çizelge 3, A** satırında tarif edilen önlemler alınmalıdır. Merdivenin sökümü sırasında **Çizelge 3, B'**deki önlemler alınmalıdır.
7		Demir korkuluğun üzerinde sülyen (PbO)	Paslı katmanın alınması sırasında kurşun tozuna maruziyet. Elemanın sökümü sırasında kurşun tozuna maruziyet.	Demirci, inşaat işçisi, Restoratör	**Çizelge 3, B** satırında tarif edilmiştir.

6. Sonuçlar ve Tartışma

İnşaat sektörü genellikle ölümcül iş kazalarıyla ilişkilendirilse de meslek hastalıkları da sektörün önemli sorunlarından biridir. İnşaat sektörünün bir alt bileşeni olan restorasyon faaliyetleri meslek hastalıkları bakımından bir dizi riskli faaliyeti içerir. Özellikle kurşun maruziyeti, restorasyon projelerinde önemli bir meslek hastalığı nedenidir.

Özellikle 1970'li yıllardan sonra kullanılmaya başlanan modern sentetik boyalar ile birlikte geleneksel boyalardaki kurşunun varlığı unutulmuş ve tarihi yapılardaki boyalı yüzeyler risk faktörleri arasında değerlendirilmemiştir. Ancak, yukarıda da görüldüğü gibi yapı elemanları sökümünden, boya katmanlarının alınmasına kadar birçok restorasyon faaliyetinde boyalı yüzeylerden tozuma ya da buhar yolu ile kalemkarlar, restoratörler, marangozlar ve restorasyonda sahada çalışan diğer işçiler kurşuna maruz kalmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, restorasyon projelerinde kurşun maruziyetine neden olan faaliyetler detaylı olarak incelenmiş ve bu maruziyetin iş sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle, İstanbul Bebek'teki 19. yüzyıl ahşap bir evin restorasyon sürecinde yapılan saha çalışmaları sırasında, boya katmanlarında kurşun içeren bileşiklerin varlığı tespit edilmiştir. Dijital mikroskop görüntülemeleri, kurşun karbonat (üstübeç) içeren boyaların yaygın olduğunu göstermiştir. Boya raspası ve yüzey hazırlığı gibi faaliyetler sırasında, kurşun partiküllerinin havaya karışarak çalışanlar için ciddi sağlık riskleri oluşturabileceği belirlenmiştir.

Ayrıca, iş tehlike analizi (JSA) yöntemi kullanılarak, kurşun maruziyetine neden olan aktiviteler detaylandırılmış ve maruziyet riskinin azaltılmasına yönelik öneriler sunulmuştur. Örneğin, boyalı yüzeylerin raspası sırasında uygun solunum koruma ekipmanlarının kullanılması, ıslak temizlik yöntemlerinin tercih edilmesi ve çalışanların sağlık gözetimlerinin düzenli olarak yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu bulgular, restorasyon projelerinde risk yönetimi uygulamalarının önemini ve kurşun maruziyetiyle ilgili farkındalık artırıcı eğitimlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Ulusal ve uluslararası mevzuat, kurşunun sağlık risklerini azaltmaya yönelik çeşitli düzenlemeler içermektedir. Ancak, restorasyon projelerinde kurşun maruziyetini önlemeye yönelik yeterli bilgi kaynağı olduğunu söylemek mümkün değildir. Bu nedenle, araştırmanın restorasyon projelerinde kurşun maruziyeti konusunda farkındalığın artmasına ve korunma yöntemlerinin geliştirilmesinde yol gösterici olması beklenmektedir.

Kurşun içeren malzemelerle çalışma, uzmanlık gerektirir ve çalışanların bu tür risklerden korunması için uygun teknik eğitim gereklidir. Bu eğitimler, projede görev alan restorasyon uzmanları ve her seviyedeki işçi için sağlanmalıdır. Ulusal düzeyde asbest sökümü başlığında olduğu gibi kurşunla çalışma için yetkinlik arttıran eğitimlerin sağlanması faydalı olacaktır.

Çalışmada belirtildiği üzere kurşun sadece koruma altındaki eserlerde değil, 1970 yılından önce ve sonrasındaki dönemlerde inşa edilmiş yapılardaki malzemelerde bulunabilir. Kurşuna maruziyet sadece restorasyon faaliyetlerinde değil yıkım faaliyetlerinde de ortaya çıkması mümkündür. Bu bakımdan, kurşun sadece projede çalışan işçiler için değil, proje civarında oturan üçüncü kişiler ve çevre için önemli sağlık riskleri oluşturabilir. Bu çerçevede, daha fazla bilgi sağlama ve mevzuat düzenlemelerini güçlendirme hem çalışanların hem de genel halkın sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazar tüm etik standartlara uyduğunu beyan eder

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar 1: Araştırma, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak
Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Yazma – orijinal taslak,
Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Fikir Sahibi, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Acar (Sezer), D, (2017). *Surface Coatings of Exposed Timber Elements in the Second Half of the Nineteenth Century in Ottoman Istanbul,* SHATIS'17 - 4th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures Proceedings, Ed. Görün Arun, 20-22 Sept. 2017, İstanbul, Türkiye, 107-117.

Akboğa, Ö., Baradan, S., 2017. Safety in ready mixed concrete industry: Descriptive analysis of injuries and development of preventive measures. *Industrial Health,* **55,** 54–66.

Akboğa, Ö., 2011. Safety Analysis of Ready-Mix Concrete Industry. Master's Thesis, Graduate School of Ege University Izmir, 113p.

Baker Jr, E.L, Landrigan, P.J., Barbour, A.G., et al., 1979. Occupational lead poisoning in the United States: clinical and biochemical findings related to blood lead

levels. *British Journal of Industrial Medicine,* **36,** 314–322.

Cantarow, A., Trumper, M, 1944, Lead Poisoning. Baltimore: Williams & Wilkins Company.

Chao, E. Henshaw, J. 2002, Job Hazard Analysis; Occupational Safety and Health Administration (OSHA):Washington, DC, USA, 50p.

Civelek, E., 2001. Kurşuna Maruz Akü Fabrikası İşçilerinde Genotoksik Hasarın Challenge Tekniği İle Araştırılması. Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Farmasötik Toksikoloji Anabilim Dalı.

Çatıkkaş Karadağ, M., 2021. Tarihi Sosyokültürel Yapıların Günümüze Uyarlanmasında Yangın Güvenliğinin Sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÇSGB, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Meslek Hastalıkları Rehberi, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, 2011, 77-85.

Eren Akaydın, Ö., Canbay Türkyılmaz, Ç., 2018. İşlevsel Dönüşüme Uğramış Yapılarda Ergonomi Kavramı; Üsküdar Nevmekan Örnek İncelemesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **6**, 279–292.

Goldman, R.H., Baker, E.L., Hannan. M., Kamerow, D.B., 1987. Lead poisoning in automobile radiator mechanics. *The New England Journal of Medicine* **317**:214–218.

Gümürçinler, T., Akboğa Kale, Ö., 2023. Evaluation of Occupational Safety in Restoration Projects of Historic Buildings: Risk Analysis with Selected Projects. *Buildings,* **13(12),** 3088.

Gurcanlı, G., Uzun, İ.M., Öztürk, D., 2022. Managing health and safety risks in restoration/renovation of historic buildings. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, **5(3),** 181 - 193.

Halifeoğlu, F.M, Noyan, C., Halifeoğlu, Z., 2017. Tarihi Malabadi Köprüsü'nün Restorasyon Çalışmasında Kullanılan İskele Sisteminin Özellikleri ve Korumadaki Önemi, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, 579-587, Trabzon,

Ji, J.S., Schwartz J., Sparrow, D., Hu, H., Weisskopt, M. G. 2014, Occupational Determinants of Cumulative Lead Exposure: Analysis of Bone Lead Among Men in the VA Normative Aging Study, *Journal of Occupational and Environmental Medicine,* **56(4**), 435–440.

Levin, S.M., Goldberg. M., Doucette, J.T., 1997, The effect of the OSHA lead exposure in construction standard on blood lead levels among iron workers employed in bridge rehabilitation. *American Journal of Industrial Med*icine, **31,** 303–309.

Özbolat, G., Tuli, A., 2016. Ağır Metal Toksisitesinin İnsan Sağlığına Etkileri, *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, **25(4),** 502-521.

Özgünler, M., 2018. Tarihi Binalarda Yangına Karşı Korunma ve Mevzuatın İrdelenmesi, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* **9(1)**, 14-21.

Phillips B. 2011. Lead exposure in road construction. *Occupational Health and Saf*ety **80:28**, 30–21.

Rausand, M. 2005. Job Safety Analysis. System Reliability Theory, 2nd ed.;Wiley: New York, NY, USA.

Sandu et al, 2019. Multianalytical Study for Establishing the Historical Contexts of the Church of the Holy Archangels from Cicau, Alba County, Romania, for its Promotion as a World Heritage Good I. Assessing the preservation-restoration works from the 18th century, *Revista de Chimie*, **70(7),** 2538-2544.

Tabak, P., Büyükakıncı, B.Y., 2023. Risk Analysis of Restoration Works by Fine Kinney Method: An Evaluation Over Masonry Civil Architecture Examples in Fatih District, İstanbul, *International Journal of Conservation Science*, **14 (1)**, 19-32.

Tatar, Ç. P. 2014. Kurşun Maruziyetinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi.

Todd, A.C., Lee, B.K., Lee, G.S., Ahn, K.D., Moshier, E.L., Schwartz. B.S., 2001. Predictors of DMSA chelatable lead, tibial lead, and blood lead in 802 Korean lead workers. *Occupational and environmental medicine*. **58:**73–80.

Uzun, M., Öztürk, D., Gürcanlı, G.E., 2020. Mimari Restorasyon ve Konservasyon Projelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Uygulamaları, *Teknik Dergi,* **590** 10275-10290, Teknik Not.

Zakar, L., Eyüpgiller, K.K., 2015. Mimari Restorasyon Koruma Teknik ve Yöntemleri, İstanbul.

İnternet Kaynakları

1. NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health, 2024, About Lead in the Workplace, https://www.cdc.gov/niosh/lead/about/index.html (16.09.2024)
2. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Metal Madenler Alt Komisyonu Kurşun-Çinko Kadmiyum Çalışma Grubu Raporu, 1 -84, https://kutuphane.sbb.gov.tr/vufind/Record/45035 (18.01.2024)
3. EPA, Learn About Lead, https://www.epa.gov/lead/learn-about-lead (01.02.2023)
4. Lead Exposure in Construction; Interim Final Rule." Federal Register 58:84 https://www.osha.gov/laws-regs/federalregister/1993-05-04 (14.12.2024).
5. ILO. List of occupational diseases https://www.ilo.org/media/336656/download (19.11.2024)
6. OSHA, Lead- Evaluating Exposure and Controls https://www.osha.gov/lead/evaluating-controlling-exposure (31.01.2023)

7. 28733 Sayılı Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18709&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5 (07/04/2023)
8. HSA, Health and Safety Authority, 2014, Safety With Lead at Work-A Guide for Employers and Employees, https://www.hsa.ie/eng/publications_and_forms/publications/chemical_and_hazardous_substances/safety_with_lead_at_work.pdf (07.04.2023)
9. ATSDR. 2007. Toxicological profile for lead. Atlanta, GA: US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. p. 582. https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=96&tid=22 (11.12.2024)
10. Why the Area Around Notre Dame Is Now Coated with Toxic Levels of Lead, https://www.livescience.com/65451-notre-dame-sky-high-lead-levels.html (06/04/2023).
11. CCOHS, Lead on Construction Projects Fact Sheet, https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/lead_construction.html (17.05.2024)
12. Construction Industry Training Board, https://www.citb.co.uk/media/5gjhsypo/ge700-2020-gb03.pdf (17.05.2024)
13. EN IEC 31010:2019: Risk management – Risk assessment techniques https://www.iso.org/standard/72140.html (17.01.2024)
14. CCOHS–Canadian Centre for Occupational Health and Safety, 2016, Job Safety Analysis. Available online: http://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/job-haz.html (13.09.2023)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1548540
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045701 (916-927)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045701 (916-927)

Bağlantı Elemanı Üretim Verimliliğini Artırmak İçin Soğuk Dövme Prosesinde Tasarım İyileştirme ve Simülasyon Çalışmaları

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.09.2024
Kabul/Accepted: 27.01.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Design Enhancement and Simulation Studies in Cold Forging Process to Increase Efficiency in Fastener Production

Tuğçe YAĞCI[1*], Alper BAYGUT[2], Osman ÇULHA[1]

[1] *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Manisa, Türkiye*
[2] *Bolt Bağlantı Elemanları San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, özel bir bağlantı elemanının kesit geometrisinde silindirik formdan kareye değişikliği ve soğuk dövmede operasyon adım sayısının azaltılması ile üretim verimliliğinin artırılması hedeflenmiş ve üretim sırasında hammadde ve kalıpta ortaya çıkan gerilmeler incelenmiştir. Çalışmada, tasarım ve proses parametreleri simülasyon analizleri ile belirlenmiş, prototip üretimler gerçekleştirilmiş ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bağlantı elemanı, geleneksel proses tasarım çalışmalarıyla öngörülen 5 veya 6 operasyonla, 20MnB4 düşük karbonlu çelik hammadde kullanılarak üretilmiştir. Simülasyona dayalı tasarım çalışmalarında; kesit daralmaları, kare kesitin silindirik hammaddeden eldesi ve kafa formunun oluşturulması sırasında meydana gelen gerilme değerleri araştırılmıştır. Prototipleme sürecinde, simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre, iki ekstrüzyon operasyonunun tek kalıpta gerçekleştirilmesi ve optimum kalıp gerilmelerinin tespit edildiği 5 operasyonlu proses tasarımına dayanan soğuk dövme yöntemiyle üretim yapılmıştır. Araştırmanın sonucunda, sanal ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sanal ve gerçek veriler arasında ortalama %98,9 düzeyinde bir uyum tespit edilmiştir. Ayrıca, kalıp maliyetinde yaklaşık %15 oranında azalma ve kafa altı kare form bölgesinin şekillendirilmesinde kullanılan kalıp ömründe %18 oranında artış elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Soğuk dövme; Bağlantı elemanı; Simülasyon çalışmaları; Optimizasyon; Prototip üretim.*

Abstract

In this study, a modification was made to the cross-sectional geometry of a specific fastener, changing it from a cylindrical form to a square and by reducing the number of operational steps in cold forging and the stresses induced in the raw material and the die during production were examined. In the study, design and process parameters were determined through simulation analysis, prototypes were produced, and experimental validation studies were conducted. The fastener was produced using 20MnB4 low-carbon steel raw material through 5 or 6 operations as predicted by conventional process design methods. In the simulation-based design studies, the stress values occurring during cross-sectional reductions, the formation of the square cross-section from cylindrical raw material, and the head shaping process were investigated. During the prototyping process, based on the results of the simulation studies, production was carried out using the cold forging method with a 5-operation process design, in which two extrusion operations were performed in a single die, and optimal die stresses were identified. As a result of the study, it was determined that there is an average compatibility of 98.9% between the obtained virtual and real production data. Furthermore, approximately a 15% decrease in die cost and an 18% increase in die life used for shaping the head square form region were achieved.

Keywords: *Cold forging; Fastener; Simulation studies; Optimization; Prototype production.*

1. Giriş

Dövme, en eski metal işleme yöntemlerinden biri olup, günümüzde özellikle otomotiv ve beyaz eşya gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, karmaşık geometriye sahip ve "net şekle yakın" üretimlerde sıkça tercih edilmektedir (Black ve Kohser 2012, Dalbasco *vd.* 2021). Dövme işlemi, bir zımba ve kalıp arasında sıkıştırılan ham maddeye darbe veya basınç altında kontrollü bir plastik deformasyon uygulanmasıyla, metale istenilen geometrinin kazandırılmasına dayalı bir plastik şekil verme yöntemidir. Uygulandığı sıcaklığa göre, iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ise sıcak dövme veya altındaki sıcaklıklarda soğuk dövme olarak adlandırılır. Yüksek kalitesi ve verimliliği ile ön plana çıkan soğuk dövme yöntemi, diğer üretim yöntemlerine göre proseste daha az hurda oluşması nedeniyle otomotiv motor parçaları, havacılık bileşenleri ve bağlantı elemanları sektörlerinde tercih edilmektedir. Ayrıca, prosesin ortam sıcaklığında gerçekleşmesi, üretim hızının ve nihai ürünün yüzey kalitesinin yüksek olması,

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tuğçe Yağcı e-posta / e-mail: tugce.yagci@cbu.edu.tr

basit ve karmaşık kesitlere sahip farklı parçaların üretimi için uygunluğu gibi avantajları bulunmaktadır (Chen *vd.* 2018). Prosesin avantajlarına ek olarak, şekillendirme sırasında yüksek güç gereksinimi de dezavantajıdır (Groover 2010). Mekanik, mühendislik, inşaat, otomotiv, elektronik ve diğer birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan bağlantı elemanları soğuk dövme ile üretilebilmektedir. Bağlantı elemanı, bir yapıda veya mekanizmada parçaları bir araya getiren ve sabitleyen, genellikle metal veya plastikten imal edilmiş bir parçadır. Bu elemanlar, vida, somun, cıvata, pim, kelepçe gibi çeşitli tiplerde olabilirler ve genellikle montaj sırasında parçalar arasında güvenilir bir bağlantı sağlarlar.

Dövme prosesinde, operasyonlar arası şekillendirme sürekliliğinin korunması (katlanma, kopma, yırtılma vb. gibi sorunlar olmaksızın) için malzemenin şekil alma özelliğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Soğuk dövme prosesinde, nihai ürün elde edilmesi ön şekillendirme ile mümkün olmaktadır. Araştırmalar, nihai ürünün üretilebilirliği ve boyutları üzerinde ön tasarımların etkili olduğunu göstermektedir (Jo *vd.* 2021, Ku *vd.* 2013, Huang *vd.* 2016). İşlem sonucunda nihai boyutların elde edilmesinde en belirleyici faktör, kalıp tasarımıdır. Operasyon parçaları, kalıplara girerek kalıp formunu alır ve bu nedenle kalıp ölçüsü ve formu, operasyon ürününe yansır. Takım ömrü, bağlantı elemanı üretiminde dövme maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Rekabet gücünü ve takım ömrünü artırmak için kalıp tasarımının optimal bir şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Gider kalemleri içinde yer alan kalıplar, toplam üretim maliyetinin ortalama standart ürünlerde %10'unu ve özel ürünlerde ise %40'ını oluşturmaktadır. Sürdürülebilirliği artırmak ve maliyeti azaltmak için kalıp ömrünün iyileştirilmesi önemlidir. Kalıp maliyeti ve miktarı, iş parçasının kesiti, hammaddesi ve üretim sayısına bağlıdır (Bunge *vd.* 2000).

Soğuk dövme kalıpları, tekrarlı çekme ve basma kuvvetlerine maruz kalır ve bu etki altında çalışır Dolayısıyla, bu tip yüke maruz kalacak kalıp malzemesi seçilirken dikkatli olunmalıdır (Pedersen 2000). Seçilen kalıp malzemesi, şekillenecek parçanın hammaddesiyle birlikte tasarım parametrelerinden birini oluşturur. İş parçasının malzeme özelliklerine dayalı olarak yapılan kalıp hasarı incelemelerinde, malzeme özelliklerinin kalıp yorulmaları üzerindeki etkisi görülmüştür (Jesner *vd.* 2008). Deformasyon olan kesitte oluşan gerilmelerin dağıtılması ve belirlenmesi için gelişmiş plastik teorisi, özellikle viskoplastisite gibi deneysel ve analitik yöntemlerin kullanılması mümkündür (Gusel ve Rudolf 2015). Yapılan bir araştırmada, alternatif hammaddelerin mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) gibi özellikleri ile kalıp yorulmaları arasındaki ilişkiyi ifade edebilecek bir formülasyon geliştirilmiştir (Saroosh *vd.* 2007).

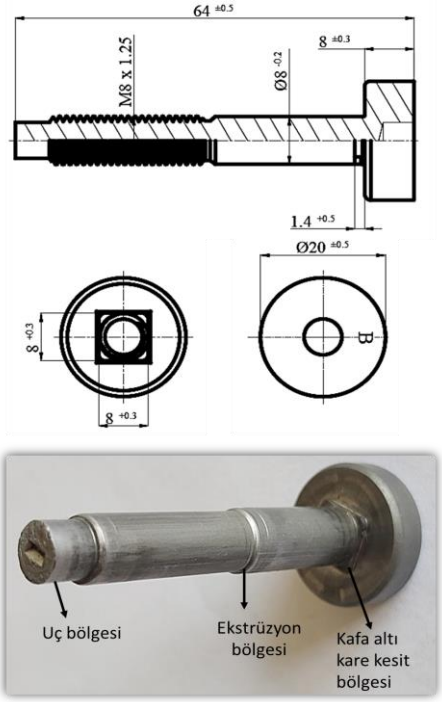
Şekillendirme sürecinde kalıplar, tekrarlayan gerilmeler altında çalıştığından, yorulma hasarı belirtileri daha erken görülebilir ve deformasyon genellikle elastik bölgede meydana gelir. Hammaddenin kalıp içine alınması, kalıbın şeklini alması ve dövme işlemi sonrasında kalıptan çıkarılması esnasında, kalıbın bir miktar geri esnemesi beklenir (Lee *vd.* 2002). Yüksek gerilmelerin olduğu şekillendirmelerde, kalıplarda kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir. Şekillendirme sırasında, kalıp ile parçanın birleşim yüzeyinde oluşan gerilme, belirlenen maksimum değeri aşabilir ve bu durumda kalıp kırılabilir. Ayrıca, kalıbın iç yüzeyinde meydana gelen aşınma, kalıp ömrünü azaltan etkenlerden biridir (Behrens *vd.* 2016). Şekillendirme esnasında, kalıplarda oluşan gerilmeleri inceleyen araştırmalarda, yüksek çevrimin yorulmaya ve sonrasında kırılmaya yol açtığı tespit edilmiştir (Varfolomeev *vd.* 2017). Bir diğer araştırmada, şekillendirme esnasında kesit geçişlerinde meydana gelen maksimum asal gerilme değerlerinin ve kalıba etkiyen kuvvetin kalıp malzemesinin akma dayanımını aşabileceği belirtilmiştir (Knoerr *vd.* 1994).

Plastik şekillendirmede, özellikle soğuk dövme işleminde, kalıp kırılması veya hasarı istenmeyen sonuçlardır. Kalıbın yenilenmesi veya değiştirilmesi, iş sağlığı açısından önemli ve maliyetli bir durumdur. Bu nedenle, tasarım süreçlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, kalıp gerilmeleri, yorulma analizleri ve olası şekillendirme hataları tahmin edilerek, hasarlar en aza indirilebilir veya önlenebilir. Bağlantı elemanlarının soğuk şekillendirilmesinde kullanılan sonlu elemanlar analizleri, gerçek dövme makinelerinde üretim öncesinde bilgisayar destekli operasyon ve kalıp tasarımlarının doğrulanmasını sağlar (Petrescu *vd.* 2002, Chang *vd.* 2013, Chai *vd.* 2020). Bu analizlerle verimlilik çalışmaları, maliyet iyileştirme ve kalitesel gelişim sağlamanın yanında öngörülemeyen tasarım- üretim hatalarının tespiti, dövme güçleri, dövme presi özellikleri, hammadde şekil alabilirliği (lif yönlenmeleri) gibi kriterlerin önceden belirlenmesinde etkin rol almaktadır (İnce ve Güden 2008). Genellikle kalıplarda gerilme analizlerinin yapılmasında sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır (Güler ve Şen 2016). 2019 yılında yapılan bir çalışmada soğuk dövme ile üretilen soketli tip bağlantı elemanının üretiminde kullanılan kalıplar analiz edilmiş ve kalıplarda ömür artışı sağlanması için baskı hasar mekanizmaları ortaya konmuş ve buna yönelik çözüm önerileri sunulmuştur (Toparlı, 2019). Bir diğer araştırmada ise, dövme işlemlerinde ortaya çıkan operasyon ve takım hasarlarını incelenerek,

mevcut tasarımlar optimize edilmiş ve proses verimliliği artırılmıştır (Kılıçaslan ve İnce 2017).

Bu çalışmaların yanı sıra, soğuk dövme süreçlerinde, sayısal analizlerin ve deneysel yöntemlerin birlikte kullanımı ile ilgili literatürde güncel çalışmalar da mevcuttur. 2020 yılında yapılan bir çalışmada, 42CrMo4 çeliğinden üretilen flanşlı boşluklu iş parçalarının soğuk dövme süreci, Deform 2D/3D yazılımı kullanılarak nümerik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Ürün geometrisi ve işlem parametreleri, sünek kırılma kriteri ve şekillendirme kuvvetleri dahil edilerek incelenmiş ve önerilen dövme tekniğinin ilgili parçaların üretiminde uygulanabilirliği değerlendirilmiştir (Winiarski *vd.* 2020). Bu nümerik analizler, gerinim ve gerilme dağılımlarını ile şekillendirme kuvvetlerini gerçek üretim öncesi öngörmeye yardımcı olmaktadır. Ancak, deneysel doğrulama kritik öneme sahiptir. Bir derleme çalışmasında, soğuk şekillendirilmiş elemanlardaki artık gerilme dağılımlarını belirlemek için farklı deneysel ve nümerik yöntemler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, metal şerit deformasyonu ve sonlu elemanlar simülasyonları üzerine mevcut literatür gözden geçirilmiş ve artık gerilmelerin öngörülmesindeki analitik ifadelerin ve hesaplama sınırlarının önemi vurgulanmıştır (Diaz *vd.* 2021). Bir diğer araştırmada, pres gibi geleneksel makineler kullanılarak boşluklu bir manşonun dövme yöntemi ile üretilmesini sağlayacak bir süreç geliştirilmesi ve doğrulanması amaçlanmıştır. Boşluklu elemanların dövme süreci, EN 42CrMo4 çeliği için yapılan nümerik simülasyonlar ve EN AW-6060 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel doğrulamalarla birlikte incelenmiştir. Nümerik ve deneysel yöntemlerin bir arada kullanıldığı araştırmada, malzeme tasarrufu sağlanmış ve geleneksel makinelerle etkin bir dövme süreci geliştirilmiştir (Bulzak *vd.* 2022).

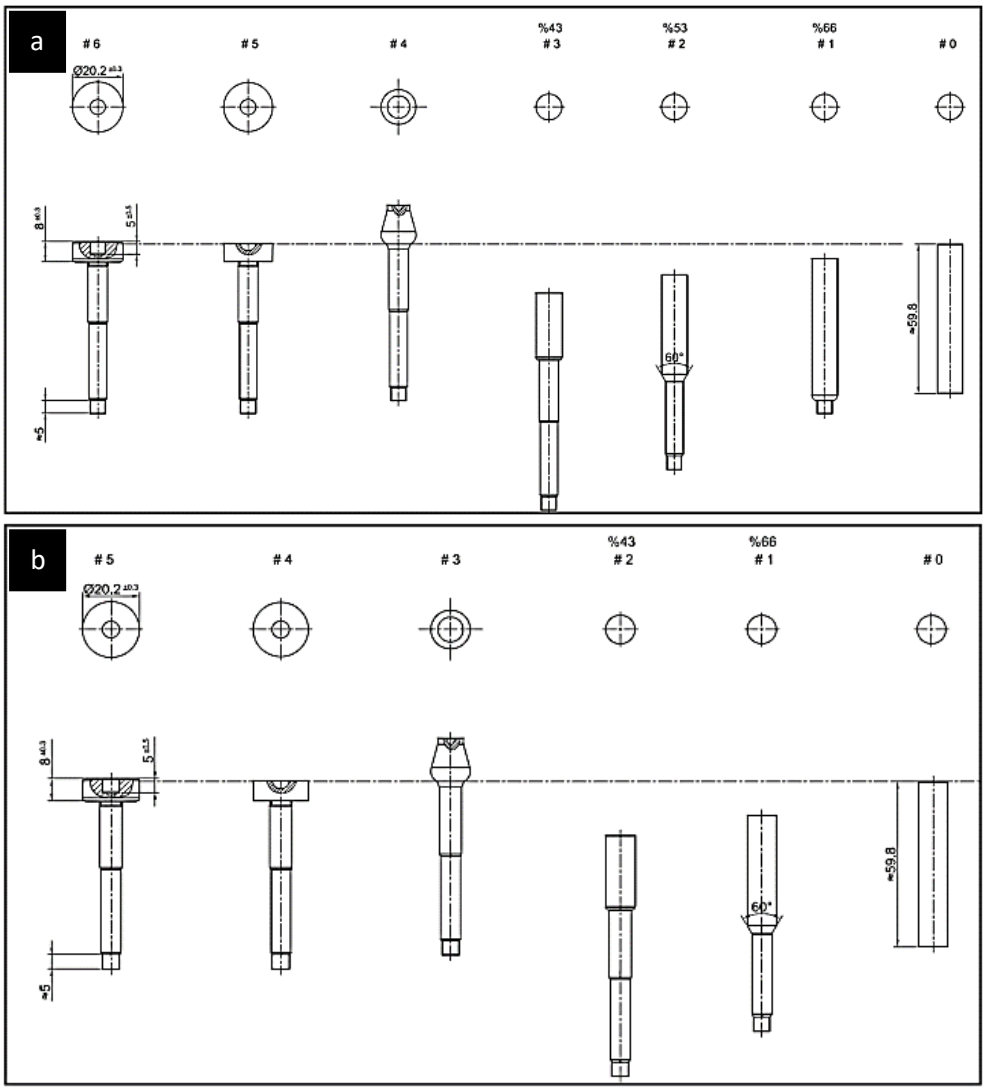
Bu çalışmada, özel bir bağlantı elemanının kritik bir bölgesinde silindirik formdan kare kesite geçişinde ortaya çıkan gerilmeler optimize edilerek, üretim süreçlerinde verimliliği artırma ve üretim kaynaklı kusurları önleme amaçlanmaktadır. Çalışmada, soğuk dövme ile üretilen bir bağlantı elemanında silindirik kesitten kare kesite geçiş gibi plastik şekillendirmeye dayalı karmaşık ve zorlu bir mühendislik problemine yönelik yenilikçi bir çözüm yaklaşımı sunulmaktadır. Bu çalışmada, kesit değişiminde kalıp üzerinde ve hammaddede oluşan yüksek gerilmeler belirlenmiş ve simülasyon destekli alternatif tasarımlarla parametre optimizasyonu sağlanmış ve gerilmelerin en uygun seviyeye indirilmesiyle üretim verimliliği artırılmıştır. Özellikle, kalıp tasarımı ve operasyon süreçlerinin simufact.forming yazılımı kullanılarak analiz edilmesiyle, geleneksel hesaplamaların doğruluğu artırılmış ve tasarım süreçlerinde karşılaşılan hataların (kalıp hasarları, verimsizlik, plastik şekillendirme kusurları, yüzey problemleri vb.) önlenmesine yönelik bir üretim yol haritası sunulmuştur. Bu bağlamda, çalışmada bağlantı elemanı üretiminde sanal ve gerçek üretim verilerinin entegrasyonu, şekillendirme süreçlerinde simülasyon destekli tasarım ve optimizasyon konularının önemine dikkat çekilerek, endüstriyel üretim süreçlerinde kalite kontrol ve verimlilik artırma konularında literatüre değerli bir katkı sağlanmıştır.



Şekil 1. Prototip üretimi gerçekleştirilecek özel bağlantı elemanının teknik çizimi ve kritik bölgelerinin görseli.

2. Materyal ve Metot

Şekil 1'de teknik çizimi ve detayları verilen özel bağlantı elemanının simülasyon destekli tasarlanması ve optimal tasarım sonuçlarına göre üretilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, ürünün kafa altı bölgesinde yuvarlak kesitten kare kesite geçişi ve gövde çapının elde edilmesi için uygulanan ekstrüzyon prosesi ile ekstrüzyon kalıplarının özellikleri dikkate alınmaktadır. Özellikle kafa altı-ekstrüzyon bölgesindeki kalıp gerilmeleri, tasarım sürecinde önemli sınır şartlarını oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, şekillendirmeyi sağlayacak presin özellikleri, yani kuvvet ve operasyon sayısı, tasarım aşamasında önemli bir rol oynamaktadır. Verimlilik çalışmaları incelendiğinde, Şekil 2'de gösterilen soğuk dövme ile bağlantı elemanının üretimi için 5 ve 6 operasyonlu alternatif proses tasarımları oluşturularak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Araştırma sürecinde simülasyon çalışmaları ve üretimlerde, EN 10263-4 standardında belirtilen dövülebilir ve ısıl işlem görebilir çelikler listesinde bulunan 20MnB4 malzemesi kullanılmıştır.



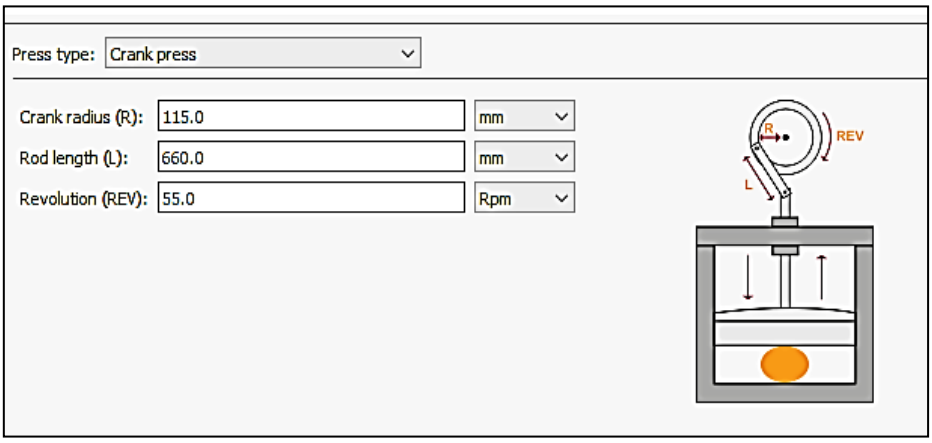
Şekil 2. Alternatif proses tasarımları a) 6 operasyon, b) 5 operasyon.

İlgili malzemenin standartta belirtilen kimyasal bileşimi ve spektral olarak ölçülen kimyasal bileşim bilgileri Çizelge 1'de sunulmuştur. Alternatif tasarımların çıktıları incelendiğinde, özellikle ekstrüzyon bölgeleri ve kafa altı kare bölgesine odaklanılarak optimum tasarım sonuçları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, simülasyonun doğruluğunu ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için 3 boyutlu (3D) katı modeller, çalışma sıcaklıkları, çözüm ağı (mesh) yapısı, makine özellikleri, sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı gibi çeşitli parametreler tanımlanmıştır. Soğuk dövme yöntemi, malzemeye herhangi bir ek ısıtma uygulamadan, istenilen form ve ölçüsel hassasiyetlerin kazandırıldığı bir üretim tekniği olduğundan, oda sıcaklığında gerçekleşen bu süreçte, simülasyon çalışmaları için işlem sıcaklığı parametresi 20 °C olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, malzeme davranışının ve şekillendirme sürecinin gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Şekil 3'te verilen makine verileri de simufact.forming bilgisayar destekli analiz programına aktarılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Dövme presi olarak kullanılan krank presine ait veriler ve kinetik sürtünme kuvveti hızdan bağımsız olduğu Coulomb sürtünme modeli ile 0,06 C sürtünme katsayısı girdi olarak işlenmiştir.

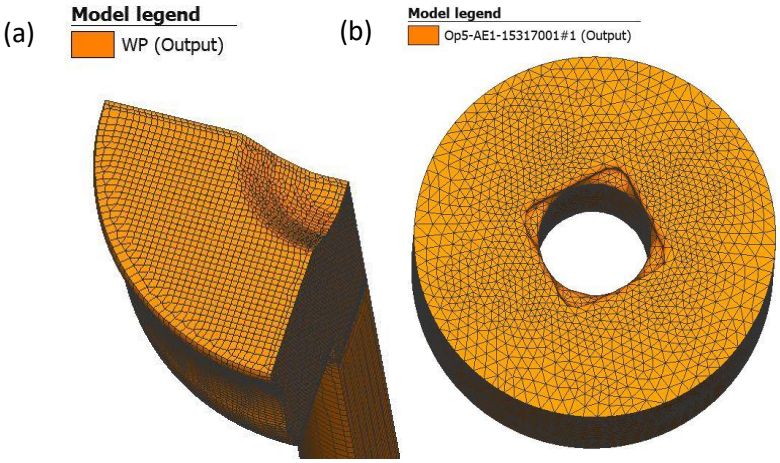
Şekillendirme analizlerinde bağlantı elemanının daha hassas ve düzgün bir şekilde modellemesi için Hexahedral mesh (Hexmesh) kullanılmıştır. Kalıp analizlerinde ise daha karmaşık geometrilere sahip yapıların modellemesi için Tetrahedral mesh (Tetmesh) tercih edilmiştir. Şekil 4'te gösterilen mesh türleri, ilgili analizlerin doğruluğunu artırmak ve çözüm süreçlerinin verimliliğini sağlamak adına seçilmiştir.

Çizelge 1. 20MnB4 çeliğinin kimyasal kompozisyon bilgileri.

Alaşım elementi (% ağ.)	Standart	Kullanılan
C	0,18-0,23	0,20
Si	max 0,30	0,07
Mn	0,90-1,20	1,02
P	max 0,025	0,004
S	max 0,025	0,009
Cr	max 0,30	0,14
Cu	max 0,25	0,03
B	0,0008-0,005	0,0035



Şekil 3. Dövmede kullanılan pres için simufact.forming yazılımında simülasyon girdi parametreleri.



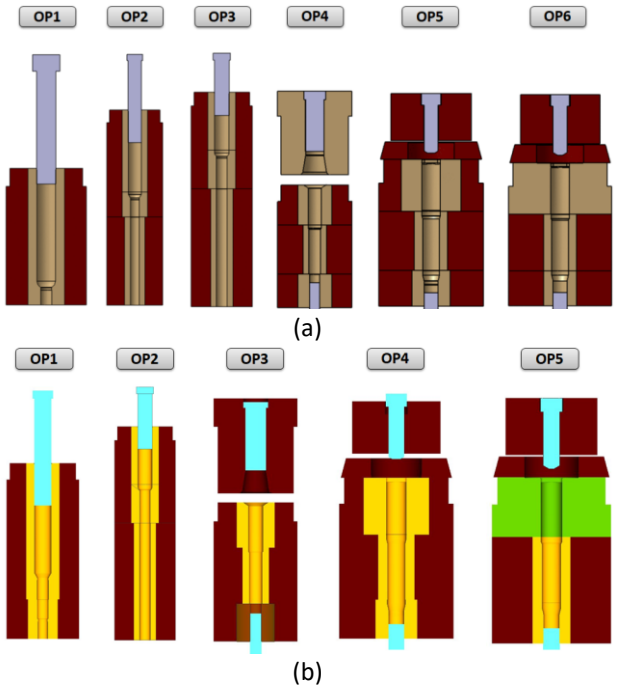
Şekil 4. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan mesh yapıları a) Bağlantı elemanı (hexahedral) b) kalıp (tetrahedral).

Proses tasarım çalışmalarına ek olarak, operasyonların iki boyutlu (2D) tasarımları temel alınarak üç boyutlu kalıp modelleri oluşturulmuştur. Kalıp tasarımı, üretim sürecinin doğruluğunu ve verimliliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, simülasyon analizlerinde girdi olarak kullanılan 3D kalıp modelleri, geometrik hassasiyetin yanı sıra malzeme akışını optimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. Oluşturulan 3D kalıp modelleri, Şekil 5'te sunulmaktadır. Bu modeller, simülasyon yazılımına aktarılmış ve soğuk dövme presi içerisinde şekillendirme sürecine uygun olacak şekilde global eksenlerde konumlandırılmıştır.

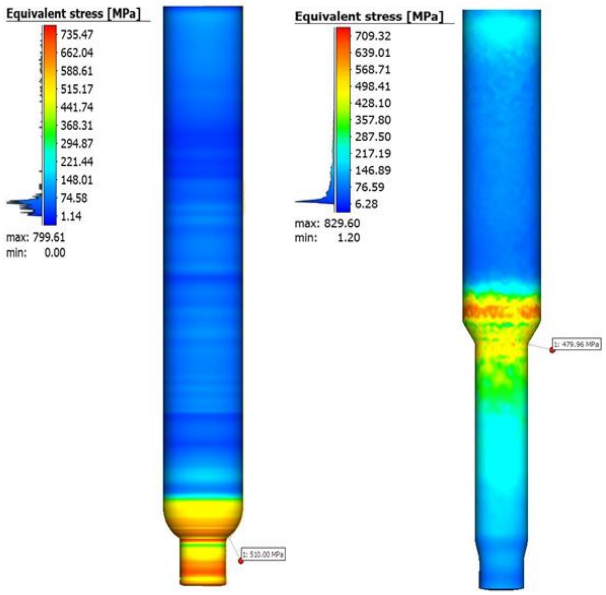
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Simülasyon Çalışmaları

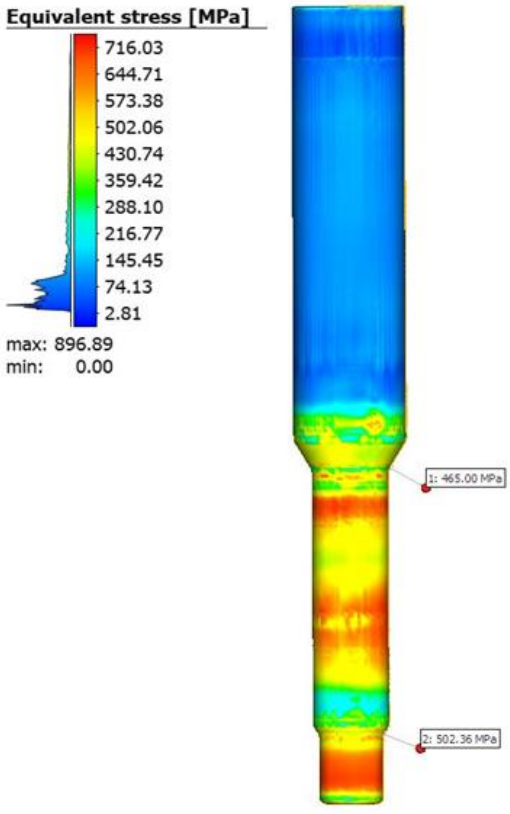
Alternatif olarak değerlendirilen 5 ve 6 operasyonlu tasarımlarda (Şekil 2) kritik olan, kafa altı ve ekstrüzyon bölgeleri simülasyon çalışmalarıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kullanılan 20MnB4 çelik malzemesinin stres altındaki davranışını incelemek amacıyla, deformasyona bağlı değişen akma dayanımı eğrileri kullanılmış ve birim şekil değişimine göre gerilme hesaplamaları yapılmıştır. Altı operasyon tasarımın 1. ve 2. aşamalarından elde edilen ara ürünlere ve beş operasyonlu proses tasarımının 1. aşamasından sonra elde edilen ara ürüne ait eşdeğer gerilme değerlerini gösteren simülasyon sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'te sunulmuştur.



Şekil 5. Dövme işleminde kullanılan 3D kalıp modelleri a) 6 operasyonlu tasarım, b) 5 operasyonlu tasarım.

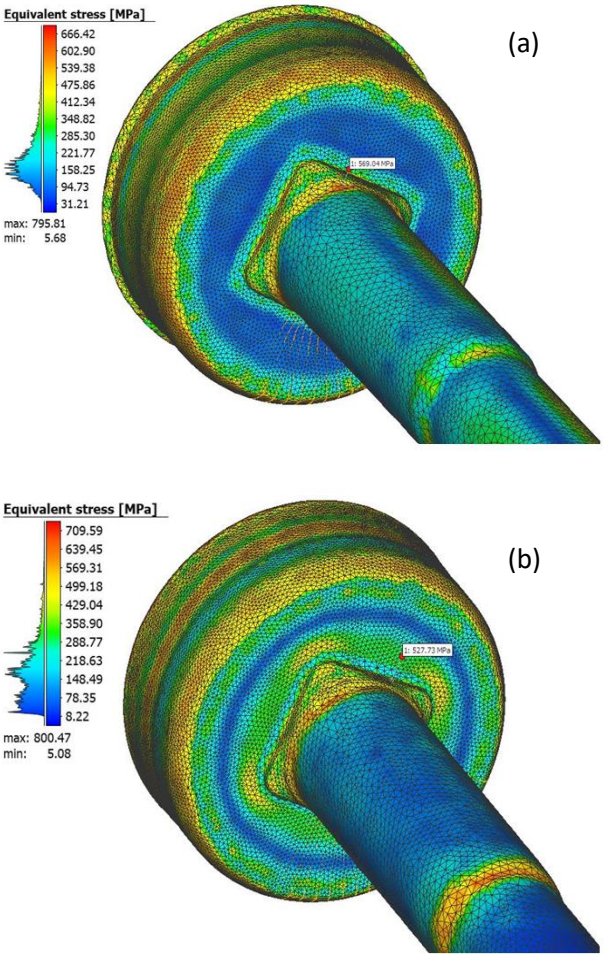


Şekil 6. 6 operasyonlu dövme prosesi tasarımında 1. ve 2. Operasyon basamaklarında elde edilen eşdeğer gerilme değerleri (MPa).



Şekil 7. 5 operasyonlu dövme prosesi tasarımında 1. ve 2. Operasyon basamaklarında elde edilen eşdeğer gerilme değerleri (MPa).

Buna göre, operasyon adımlarına göre sınıflandırılmış farklı dövme proses tasarımları için bağlantı elemanının uç bölgesi ile boğaz bölgesindeki eşdeğer gerilim değerleri karşılaştırılmıştır. Bu veriler, farklı operasyon adımları ve dövme proses tasarımlarının uç ve boğaz bölgelerinde ortaya çıkan mekanik yüklenme dağılımlarını analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. 6 operasyonlu dövme proses tasarımı için 1. operasyon adımında, uç bölgesinde eşdeğer gerilim 510 MPa olarak ölçülmüş, boğaz bölgesi için beklenildiği gibi bu aşamada kritik bir veri kaydedilmemiştir. Öte yandan, 2. operasyon adımında, boğaz bölgesinde eşdeğer gerilim 479 MPa olarak raporlanmıştır. 5 operasyonlu dövme proses tasarımı için ise, 1. operasyon adımında hem uç hem boğaz bölgesi eş zamanlı şekillendirildiğinden eşdeğer gerilim uç bölgesinde 502 MPa ve boğaz bölgesinde 465 MPa olarak ölçülmüştür.



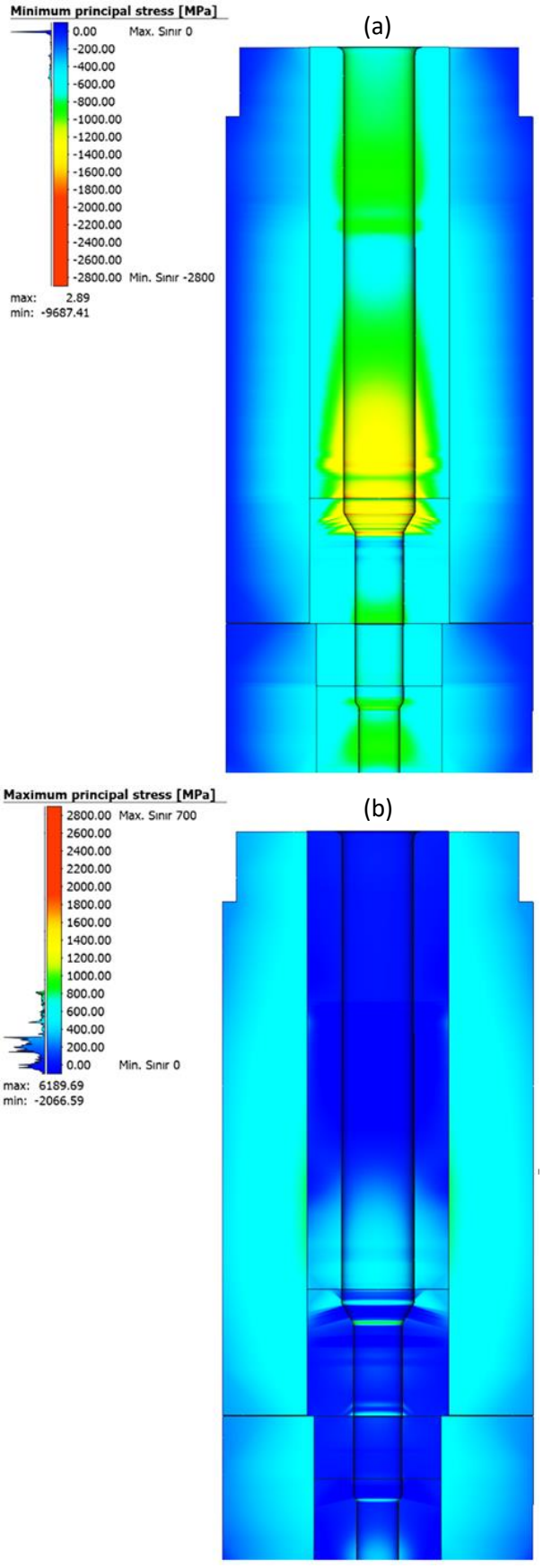
Şekil 8. Kafa altı bölgesi eşdeğer gerilim analizi a) 6 operasyonlu tasarımın 6. Operasyon adımı, b) 5 operasyonlu tasarımın 5. operasyon adımı.

Şekil 8, farklı dövme proses tasarımlarının kafa altı bölgesi kritik eşdeğer gerilim değerlerine etkisini göstermektedir. 6 operasyon içeren proses tasarımında, kafa altı yan yüzeyde elde edilen eşdeğer gerilim 549 MPa, kafa altı alt yüzey bölgesinde ise 569 MPa olarak ölçülmüştür. Bu

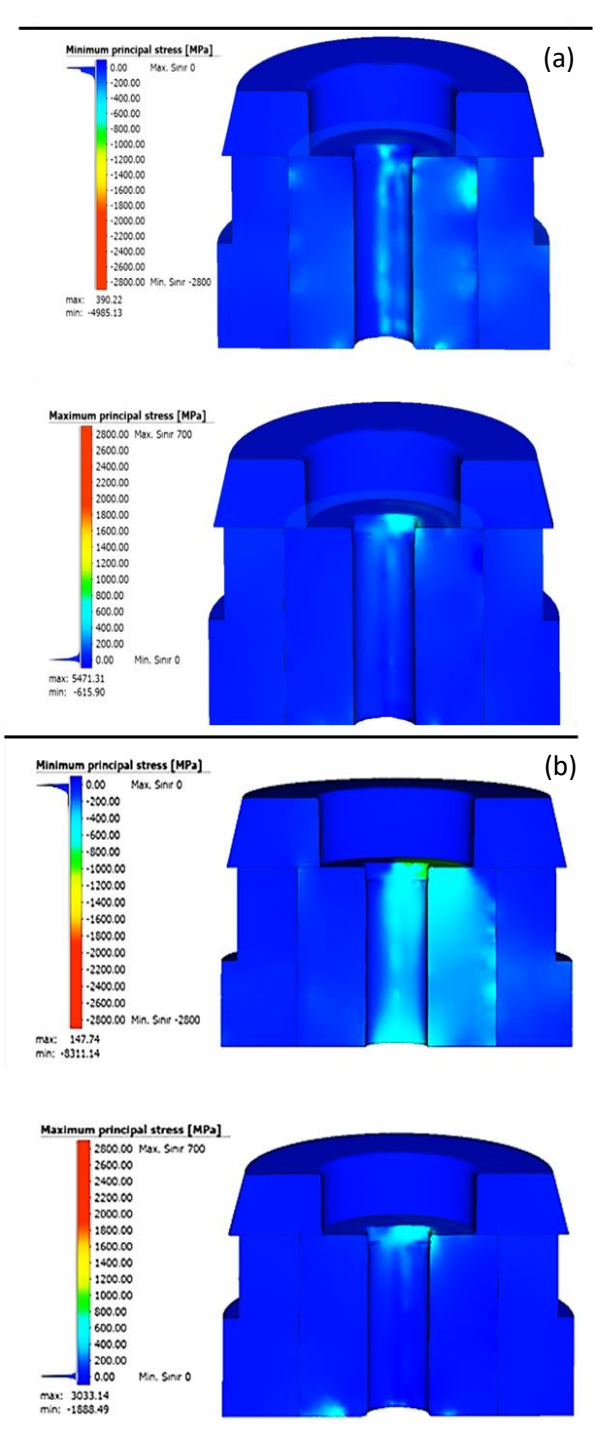
durum, kafa altı bölgesinde kafanın diğer bölgelerine göre oldukça yüksek bir gerilim birikmesi olduğunu göstermektedir. 5 operasyon içeren tasarımda ise, kafa altı yan yüzeyde eşdeğer gerilim 513 MPa'ya, kafa altı alt yüzey bölgesinde ise 527 MPa'ya düşmüştür. Bu veriler, dövme proses tasarımındaki operasyon sayısının azaltılmasının, özellikle kafa altı bölgesinde gerilim seviyelerini azaltabileceğini göstermektedir.

3.2. Kalıp Simülasyon Çalışmaları

Şekil 6, 7 ve 8'de sonuçları gösterilen analizler değerlendirildiğinde, beş ve altı operasyonlu tasarımlardaki kritik gerilmelerin aynı kesitlerde birbirlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu noktada, beş operasyonlu proses tasarımı gerçek üretim bakımından daha elverişli görünmektedir. Ayrıca, soğuk dövme alanındaki araştırmalar, soğuk dövmede kullanılan kalıplardaki maksimum çekme gerilmesinin azaltılmasının kalıp ömrünü önemli ölçüde artırabileceğini göstermekte ve kalıp tasarımında stres analizinin önemini vurgulamaktadır (Zhang *vd.* 2021). Bir başka çalışmada, kalıba etkiyen en yüksek birincil stresin azaltılması ve ön yük profili üzerinde yapılan hafif bir değişiklikle, kalıp ömründe önemli ölçüde artış sağlanabileceği tespit edilmiştir (Dalbasco *vd.* 2021). Yapılan bir diğer araştırmada ise, stresi azaltmayı ve kalıp performansını artırmayı amaçlayan çeşitli yüzey işleme yöntemleri incelenmiştir (Wagner *vd.* 2006). Bu çalışmaların tümünde, soğuk dövme operasyonlarında kalıp ömrünü artırmada stres azaltmanın kritik rolü vurgulanmaktadır. Bundan dolayı, beş ve altı operasyonlu proses tasarımlarında kafa altı kare kalıpta asal gerilim analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 9, ekstrüzyon kalıbındaki asal gerilim dağılımı analiz sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, Şekil 9.a'da mavi ve yeşil renkler ile temsil edilen bölgeler düşük gerilim bölgelerini ifade etmektedir. Şekil 9.b ise, bağlantı elemanının şekillendirilmesi sırasında, ekstrüzyon kalıbındaki yüksek gerilme bölgelerini temsil etmektedir. Bu analiz, ekstrüzyon kalıbındaki gerilim dağılımının kritik bölgelerini belirlemek için yapılmıştır. Şekil 9'da görüldüğü üzere, ekstrüzyon kalıbında maksimum asal gerilmeler hasara sebebiyet verebilecek kritik değerlere erişmemektedir. Minimum asal gerilim negatif değerler alırken, maksimum asal gerilim pozitif değerlere sahiptir ve bu durum, kalıp malzemesinin belirli bölgelerinde çekme ve basma gerilimlerine maruz kaldığını gösterir. Özellikle yüksek maksimum asal gerilim bölgeleri, malzemede deformasyon veya çatlak oluşumu gibi sorunlara yol açabilir. Bu tür analizler, kalıbın güvenilirliğini artırmak ve olası hasarları önlemek için tasarım optimizasyonunda kullanılmaktadır.



Şekil 9. Beş operasyonlu proses tasarımında kullanılan ekstrüzyon kalıbında asal gerilim analizi a) minimum asal gerilme b) maksimum asal gerilme.



Şekil 10. Farklı proses tasarımlarında bağlantı elemanında kafa altı bölgesi kare kesitli kalıpta asal gerilmelerin dağılımı a) beş operasyonlu tasarım, b) altı operasyonlu tasarım.

Çizelge 2'de ise farklı proses tasarımlarında kalıba etkiyen asal gerilim değerlerine ilişkin simülasyon çalışmaları ile elde edilen bulgular sayısal olarak tablo halinde verilmektedir. Bu değerler, soğuk dövme proses tasarımında kritik bölgelerde farklı operasyon tasarımları için kalıbın nasıl davrandığını anlamada önemlidir. Şekil 10 ve Çizelge 2'de yer alan veriler incelendiğinde, farklı sayıda operasyon adımı ile bağlantı elemanının şekillendirilmesinde kritik bölgelerde ortaya çıkan gerilme dağılımlarının farklılık gösterdiğini söylemek mümkündür. 6 operasyonlu tasarımda bağlantı elemanının kafa altı bölgesinin şekillendirilmesi sırasında kalıba etkiyen kritik asal gerilme değeri maksimum 499 MPa iken, aynı nicelik beş operasyonlu proses tasarımında 420 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda, azalan strese bağlı olarak 5 operasyonlu tasarımda kalıp ömrünün yaklaşık %18 arttığı söylenebilir. Literatüre bakıldığında, soğuk dövme kalıplarına etkiyen gerilmelerin iş parçası ya da kalıpta tasarım değişikliği gibi çeşitli yollarla azaltılmasına bağlı olarak, kalıp ömrünün önemli ölçüde uzatılabileceğine dair çalışmalar bu bulguyu desteklemektedir (Thara *vd.* 2019, Joun *vd.* 2022, Hussain *vd.* 2009).

Çizelge 2. Bağlantı elemanı üretiminde kullanılan kalıpta kritik bölgelere ait asal gerilme değerleri (MPa).

Asal Gerilme	Gerilme Türü	6 Operasyon	5 Operasyon		
		Kafa altı	Kafa altı	Uç	Boğaz
Maks.	Çekme (+)	499	420	417	530
Min.	Basma (-)	544	462	1017	1373

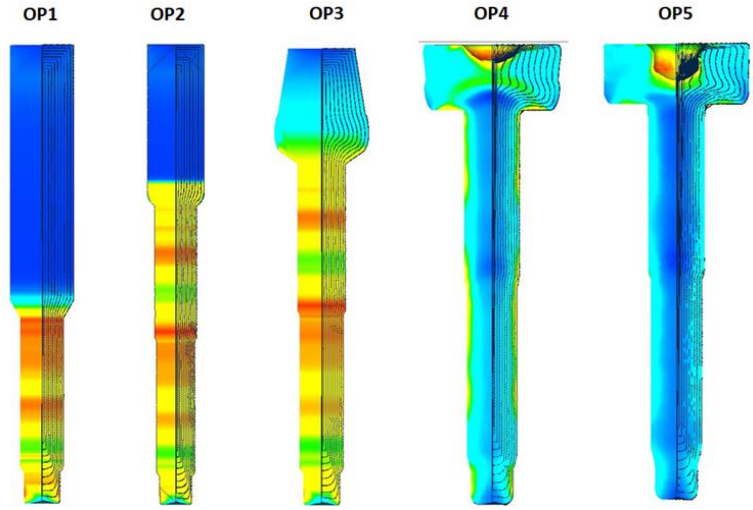
3.3. Prototip Üretim ve Deneysel Doğrulama Çalışmaları

Beş operasyonlu soğuk dövme proses tasarımına göre ulaşılan simülasyon sonuçları değerlendirilmiş ve gerçek üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Ham maddeden nihai ürüne kadar olan gerçek üretime ait operasyon basamakları Şekil 11'de gösterilmektedir.

Şekil 11. Beş operasyon adımında gerçekleştirilen bağlantı elemanı üretimine ait ham madde, ara ürünler ve ürün görselleri.

Soğuk dövme sürecinde çatlak riski ve dövme enerjisinin minimize edilmesine yönelik süreç parametrelerinin optimizasyonu hem ürün kalitesi hem de süreç güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, simülasyonlar aracılığıyla malzeme akış çizgilerinin düzgünlüğünün sağlanmasının, süreçte karşılaşılabilecek homojen olmayan deformasyon, yırtılma ve çatlama gibi problemleri önlemede belirleyici bir rol oynadığı literatür çalışmalarında da vurgulanmıştır (Kadoya *vd.* 2021, Kaur *vd.* 2019). Benzer şekilde, bu çalışmada da soğuk dövme prosesinde malzeme akışının kontrol edilmesinin, bu tür problemlerin öngörülmesi ve

önlenmesindeki etkisi ortaya konulmuştur. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, plastik şekil değiştirme sırasında kritik bölgelerde oluşan malzeme akış çizgilerinin detaylı bir şekilde incelenmesine odaklanmıştır. Elde edilen bulgular, malzeme akışının kontrollü bir şekilde yönlendirilmesinin, soğuk dövme sürecindeki deformasyon homojenliğinin sağlanması ve süreç güvenilirliğinin artırılması açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Ardından, sanal olarak elde edilen lif yönlenmeleri, prototip üründe yapılan incelemelerle kıyaslanmıştır. Üründe akış çizgilerinin ortaya çıkarılması amacıyla numuneye kesiti boyunca makro dağlama işlemi yapılmıştır. Makro dağlama işlemi için, öncelikle numune geleneksel metalografik numune hazırlama süreçlerine (kesme, zımparalama, parlatma) tabi tutulmuş ve dağlama için yüzey hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Ardından kaynatılan HCl asit çözeltisine daldırılmış ve 10 dk boyunca bekletilmiştir. Makro dağlama işlemi ile ortaya çıkan akış çizgileri optik mikroskop ile görüntülenmiştir.



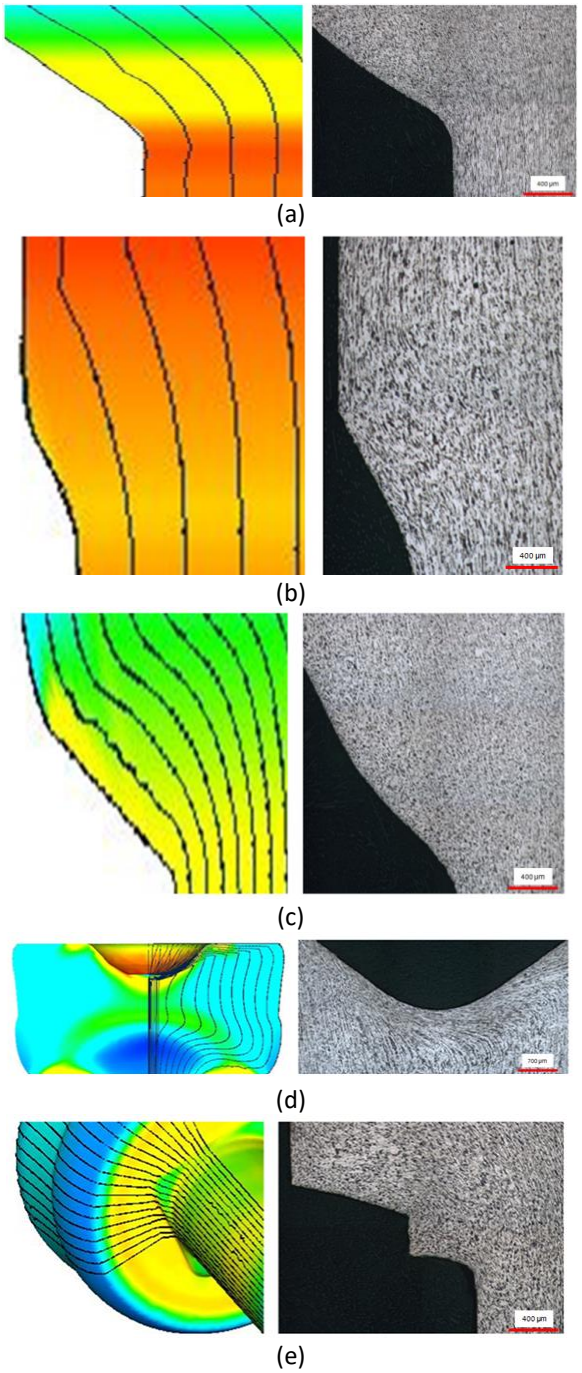
Şekil 12. Beş operasyonlu proses tasarımında simülasyon çalışmaları ile elde edilen malzeme akış çizgileri.

Simülasyon çalışmalarıyla 5 operasyonlu proses tasarımına ait malzeme akış çizgileri Şekil 12'de gösterilmektedir. Şekil 13'te ise farklı operasyon adımlarında kritik bölgelerdeki simülasyon akış çizgileri ve makro dağlama işlemi ile elde edilen malzeme akış çizgileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre, simülasyon ortamında elde edilen malzeme akış çizgileri ile prototip üründe meydana gelen lif yönlenmelerinin birbiri ile örtüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, malzeme akış çizgilerinin homojenliği ve sürekliliği üretimin başarıyla gerçekleştirildiğinin kanıtlarından biridir.

Simülasyon çalışmalarında tasarım süreçlerinin etkin şekilde yönlendirilmesi, yüksek doğrulukta ve güvenilir verilerin elde edilmesi, simülasyon programına girilen parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bu nedenle, parametrelerin dikkatlice seçilmesi ve uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi 55 adet/dk girdi olarak seçilen devir parametresi (revolution), gerçek üretim prosesinde 55±1 adet/dk olarak bulunmuş ve uygulamalı üretimler gerçekleştirilerek Şekil 11'de görülen operasyon numuneleri elde edilmiştir. Buna göre, teknik resim-tasarım- simülasyon- üretim çıktıları ölçümsel olarak karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Çizelge 3'te sunulmuştur. İlgili tabloda, teknik resim talepleri içerisinde parçanın önemli bölgelerine ilişkin boyutlar bulunmaktadır. Çizelge 3'te yer alan bulgular incelendiğinde, teknik resmin ölçümsel gerekliliklerinin sağlandığı, simüle ve gerçek veriler arasındaki hata payının oldukça düşük olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 3. Bağlantı elemanının teknik resim, tasarım, simülasyon ve üretim sonuçlarının boyutsal karşılaştırmasına ilişkin veriler.

Ölçüm Bölgesi	Teknik Resim	Tasarım	Simülasyon	Gerçek Ürün	Hata Payı (%)
Kafa çapı	20 ±0,5	19,90	19,95	20,10	**0,75**
Kafa kalınlığı	8 ±0,3	7,90	7,97	8,02	**0,63**
Kare kenar uzunluğu	8 +0,3	8,10	8,13	8,18	**0,62**
Kare yüksekliği	1,4+0,5	1,50	1,54	1,60	**3,90**
Gövde çapı	8-0,2	7,85	7,89	7,92	**0,38**
M8x1.25 diş için ovalama çapı	7,08+0,02	7,08	7,09	7,10	**0,14**



Şekil 13. Simülasyon analizleri ve deneysel çalışmalarla elde edilen malzeme akış çizgileri: a) 1. operasyon ekstrüzyon boğazı bölgesi, b) 2. operasyon gövde bölgesi, c) 3. operasyon kafa bölgesi, d) 4. operasyon kafa bölgesi (delik ve kenar), e) 5. operasyon kafa altı kare kesit bölgesi.

4. Genel Sonuçlar

Geleneksel tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen ürünlerde, tasarım parametrelerinde yapılan değişikliklerin operasyon-kalıp gerilmeleri üzerindeki etkisi önceden kestirilememektedir. Ayrıca, simülasyon destekli tasarım çıktıları ile gerçek ürün çıktıları karşılaştırıldığında, bağlantı elemanları endüstrisi için sanal üretim uygulamalarının faydalı olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada, mühendislik hesaplamaları kullanılarak oluşturulan 5 ve 6 operasyonlu alternatif tasarımlar, simülasyon çalışmalarıyla incelenmiş ve sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiştir. Buna göre aşağıda verilen bulgular elde edilmiştir.

- 6 operasyonlu tasarımda birinci operasyon uç bölgesi eş değer gerilim 510 MPa, ikinci operasyon ekstrüzyon bölgesindeki eş değer gerilim değerinin ise 479 MPa olduğu görülmüştür. 5 İstasyonlu tasarımda aynı bölgelerde eş değer gerilmeler sırasıyla, 502 ve 465 MPa olarak tespit edilmiştir. Buna göre, iki farklı proses tasarımında da aynı bölgelerin eş değer gerilim değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bu kapsamda tek kalıpta çift ekstrüzyon operasyonunun başarı ile gerçekleştiği sonuçlarına ulaşılmaktadır.

- Kafa altı bölgesindeki eşdeğer gerilme değerlerinin 5 ve 6 operasyonlu üretim tasarımlarında aynı bölgelerde yakın oldukları görülmüştür. Sonuçlar değerlendirildiğinde 6 operasyon yerine, 5 operasyonlu tasarım ile bağlantı elemanı üretiminin gerek operasyon adım sayısı gerekse üretim hızı açısından optimum tasarım olduğu sonucuna varılmıştır.
- Simülasyon çalışmalarıyla elde edilen malzeme akış analiz sonuçlarıyla, makro dağlama işlemi sonucu ortaya çıkarılan deformasyon sonucu oluşan lifsi tane yönlenmelerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, bağlantı elemanında kritik bölgelerde tasarım ve prototiplemede başarı sağlandığını göstermektedir.
- Gerçekleştirilen 5 operasyonlu simülasyon destekli operasyon–kalıp tasarımı ile yapılan gerçek üretimler sayesinde, kafa altı kare form bölgesindeki kalıp ömründe azalan kritik asal gerilme miktarına bağlı olarak yaklaşık %18 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Kalıp maliyeti bağlamında, altı operasyonlu ve yatay presin kullanıldığı proses tasarımında karşılıklı iki kalıbın bulunduğu altı istasyonda toplam 12 kalıp grubu işlemektedir. Buna karşın, üretim prosesinin beş istasyona indirilmesiyle 10 kalıp grubunun çalıştığı yeni tasarım proseste kalıp maliyet analizleri yapıldığında, yaklaşık %15 oranında bir azalma kaydedilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Makale çalışmasında tüm yazarlar tüm etik standartlara uymuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Görselleştirme, Yazma, Biçimsel analiz, Görselleştirme, İyileştirme, Yorumlama.

Yazar 2: Kaynaklar, Proje Yöneticisi, Araştırma, Deneyleme, Doğrulama, Metodoloji, Simülasyon, Fikir Sahibi.

Yazar 3: Araştırma, Deney tasarımı, Görselleştirme, Yazma, Denetleme, Danışmanlık.

5. Kaynaklar

Behrens, B. A., Puppa, J., Huskic, A., Brunotte, K., Bouguecha, A. ve Prüß, T., 2016. Influence of heat pipe cooling on the wear of hot forging dies. *Production Engineering*, **10**, 1-8. https://doi.org/10.1007/s11740-016-0698-z

Black, J. T. ve Kohser, R. A., 2012. DeGarmo's materials and processes in manufacturing, John Wiley & Sons, Inc.

Bulzak, T., Winiarski, G., Wójcik, Ł., Szala, M. 2022. Application of numerical simulation and physical modeling for verifying a cold forging process for rotary sleeves. *Journal of Materials Engineering and Performance,* **31**, 2267–2280. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06314-x

Bunge, H. J., Pöhlandt, K., Tekkaya, A. E. ve Banabic, D., 2000. Formability of Metallic Materials, Springer Berlin, Heidelberg.

Chai, U., Tzou, G. Y., Hsu, C. ve Wei, S., 2020. FEM simulation of multi-stage forging for dray fasteners. *Key Engineering Materials*, **830**, 1-8. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.830.1

Chang, T. P., Huang, S. C., Huang, T. F. ve Dao, T. P., 2013. Analysis of cold preforming process for hollow fasteners with thin flange. *Applied Mechanics and Materials*, **418**, 246-249. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.418.246

Chen, S., Qin, Y., Chen, J. G. ve Choy, C. M., 2018. A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners. *International Journal of Mechanical Sciences*, **137**, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.045

Dalbosco, M., Lopes, G. S., Schmitt, P. D., Pinotti, L. ve Boing, D., 2021. Improving fatigue life of cold forging dies by finite element analysis: A case study. *Journal of Manufacturing Processes*, **64**, 349–355. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.039

Díaz, A., Cuesta, I. I., Alegre, J. M., Jesus, A. M. P. ve Manso, J. M., 2021. Residual stresses in cold-formed steel members: Review of measurement methods and numerical modelling. *Thin-Walled Structures*, **159**, 107335. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107335

Groover, M., 2010. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, John Wiley & Sons, Inc.

Gusel, L. ve Rudolf, R., 2015. Shear stress distribution analysis in cold formed material. *Procedia Engineering*, **100**, 41-45. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.340

Güler, M. ve Şen, S., 2016. Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim Teknoloji Dergisi*, **5**(1), 56-66.

Huang, H. S. ve Hsia, S. Y., 2016. New design of process for cold forging to improve multi-stage gas fitting. *Advances in Mechanical Engineering*, **8**(4), 1-12. https://doi.org/10.1177/1687814016641571

Hussain, K., Samad, Z., Othman, A., Pilli, S. C., Salman, N. J., Badruddin, I., Hakim, S. S., Quadir, G. ve Abdullah, A. B. 2009. A study on cold forging die design using different techniques. *Modern Applied Science,* **3**. https://doi.org/10.5539/mas.v3n3p143

İnce, U. ve Güden, M., 2008. Simulation of The Cold Forging Process In Fastener Manufacture, Proceedings

III. International Scientific Technical Conferance, Minsk, Belarus, 15-17.

Jesner, G., Marsoner, S., Schemmel, I., Haeussler, K., Ebner, R. ve Pippan, R., 2008. Damage mechanisms in materials for cold forging dies under loading conditions typical for dies. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, **3**, 297-310. https://doi.org/10.1504/IJMMP.2008.018736

Jo, A., Jeong, M., Lee, S., Moon, Y. ve Hwang, S., 2021. Multi-stage cold forging process for manufacturing a high-strength one-body input shaft. *Materials*, **14**(3), 532. https://doi.org/10.3390/ma14030532

Joun, M. S., Ji, S. M., Chung, W. J., Cho, G. S. ve Lee, K. H., 2022. A new general fatigue limit diagram and its application of predicting die fatigue life during cold forging. *Materials*, **15**(7), 2351. https://doi.org/10.3390/ma15072351

Kadoya, S., Kitayama, S., Takano, M. ve Kobayashi, A., 2021. Process parameters optimization for minimizing risk of crack and forging energy in cold forging. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **87**. http://doi.org//10.1299/transjsme.20-00370

Kaur, J., Pabla, B.S., Dhami, S.S., 2019. Optimization and comparison of deformation during closed die forging of different parts. In: Malik, H., Srivastava, S., Sood, Y., Ahmad, A. (eds) *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, **698**. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1819-1_44

Kılıçaslan, C. ve İnce, U., 2017. Civata soğuk dövme işleminde kalıp ömrünün arttırılması: Dövme kademe tasarımının etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **21**(5), 961-967. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.286029

Knoerr, M., Lange, K. ve Altan, T., 1994. Fatigue failure of cold forging tooling: Causes and possible solutions through fatigue analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, **46**(1-2), 57-71. https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90102-3

Ku, T. W., Kim, L. H. ve Kang, B. S., 2013. Multi-stage cold forging and experimental investigation for the outer race of constant velocity joints. *Materials & Design*, **49**, 368-385. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.030

Lee, Y., Lee, J. ve Ishikawa, T., 2002. Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy. *Journal of Materials Processing Technology*, **130-131**, 532-539. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00800-2

Pedersen, T. Ø., 2000. Numerical modelling of cyclic plasticity and fatigue damage in cold-forging tools. *International* Journal of Mechanical Sciences, **42**(4), 799-818. https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00019-3

Petrescu, D., Savage, S. C. ve Hodgson, P. D., 2002. Simulation of the fastener manufacturing process. *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 361-368. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00301-1

Saroosh, M. A., Lee, H. C., Im, Y. T., Choi, S. W. ve Lee, D. L., 2007. High cycle fatigue life prediction of cold forging tools based on workpiece material property. *Journal of Materials Processing Technology,* **191**(1-3), 178-181. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.015

Varfolomeev, I., Moroz, S., Siegele, D., Kadau, K. ve Amann, C., 2017. Study on fatigue crack initiation and propagation from forging defects. *Procedia Structural Integrity*, **7**, 359-367. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.100

Thara, S., Prommul, K. ve Watcharasrisamroeng, B. 2019. The optimization of tool life by fillet radiuson cold forging die using finite element and low cycle fatigue theory. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, **9**(2). https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201957

Toparlı, M. B., 2019. Soğuk dövme kalıplarında ömür artışı elde etmek için baskı hasar mekanizmasının belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **24**(2), 157-171. https://doi.org/10.17482/uumfd.507586

Winiarski, G., Bulzak, T. Wójcik, Ł. ve Szala, M. 2020. Numerical analysis of a six stage forging process for producing hollow flanged parts from tubular blanks. *Advances in Science and Technology,* **14**, 201-208. https://doi.org/10.12913/22998624/116748

Zhang, Z., Yang, F., Shao, X., Gu, J., Zha, G., Tu, H. Y. ve Xie, B., 2021. Finite element analysis and life prediction of pre-stressed composed dies in cold extrusion process. *Journal of Multiscale Modelling*, **13**, 2142001. https://doi.org/10.1142/S1756973721420014

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1567267
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045702 (928-934)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045702 (928-934)

Determination of Operating Parameters of The Reactive Distillation Column for Methyl Acetate Production and Dynamic Simulation of Process

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 15.10.2024
Kabul/Accepted: 01.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Metil Asetat Üretiminin Yapıldığı Tepkimeli Damıtma Kolonunun İşletim Parametrelerinin Belirlenmesi ve Prosesin Dinamik Simülasyonu

İsmail BAYRAM[1*], Alper GÜNAY[2]

[1] *Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Chemical Engineering, Kırşehir, Türkiye*
[2] *Kırşehir Ahi Evran University, Institute of Science and Technology, Department of Advanced Technologies, Kırşehir, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

This study focuses on the simulation of a reactive distillation column used for the production of methyl acetate via the reaction between methanol and acetic acid. Using Chemcad software, a model for the methyl acetate production process was designed, incorporating a reactive distillation column. Based on the design, simulations were conducted, analyzing both steady-state and dynamic conditions. The study identified optimal operating conditions by considering parameters affecting product yield, such as feed rate, recycle flow rate, and feed temperature. Relationships between variables were evaluated, and significant insights were derived regarding the reactive distillation process. Additionally, the process was designed to consider environmental factors while supporting the profitability goals of businesses. Methyl acetate, a key organic raw material, is widely used across industries, including pharmaceuticals, paints, varnishes, plastics, essences, adhesives, artificial leather, coatings, cosmetics, solvents, resins, and certain oils.

Keywords: *Reactive distillation; Methyl acetate; Simulation; Process design.*

Öz

Bu çalışma, metanol ve asetik asidin tepkimeye girerek metil asetat üretimini sağlayan tepkimeli damıtma kolonunun simülasyonunu ele almaktadır. Chemcad yazılımı kullanılarak, tepkimeli damıtma kolonuyla metil asetat üretim sürecinin modeli tasarlanmıştır. Bu tasarıma dayalı olarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, hem kararlı hem de dinamik durum analizleri yapılmıştır. Çalışmada, besleme oranı, geri döngü akışkan miktarı ve besleme sıcaklığı gibi ürün verimini etkileyen parametreler göz önünde bulundurularak en uygun işletme koşulları belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları ile değişkenler arasındaki ilişkiler değerlendirilmiş ve tepkimeli damıtma süreci üzerine önemli çıkarımlar yapılmıştır. Böylece, rekabetçi, işlevsel ve yüksek verimliliğe sahip bir süreç tasarımı oluşturulması hedeflenmiştir. Çevresel faktörlerin de dikkate alındığı bu üretim sürecinin, aynı zamanda işletmelerin karlılık hedeflerini desteklemesi amaçlanmaktadır. Metil asetat, endüstride geniş kullanım alanlarına sahip önemli bir organik hammaddedir. Başlıca kullanım alanları arasında ilaç, boya, vernik, plastik, esans, yapıştırıcı, yapay deri, kaplama malzemeleri, kozmetik, çıkarıcılar, reçineler ve bazı yağların üretimi ya da çözücü olarak kullanımı sayılabilir.

Anahtar Kelimeler: *Tepkimeli damıtma; Metil asetat; Simülasyon; Proses tasarım.*

1. Introduction

The rapid growth of the global population, coupled with the expansion of the chemical industry, has made the efficient use of limited and non-renewable resources more critical than ever. Technological advancements in the chemical field have brought significant innovations. Research on reactive distillation has great importance from environmental, economic, and technical perspectives. Today, the chemical industry is responsible for approximately one-third of the total energy consumption and carbon dioxide emissions in the industrial sector. Distillation accounts for over 40% of the energy consumed by the chemical industry, highlighting the need for improvements in this area. Modern chemical plants increasingly require advanced distillation technologies—such as reactive distillation, divided-wall columns, thermal couplings, cyclic distillation, heat pump-assisted distillation, and heat-integrated distillation columns—that can significantly reduce energy consumption and carbon footprints. There are various challenges and opportunities in rethinking energy usage for a more sustainable chemical industry. The methods used in experimental studies must be presented in a detailed and explanatory manner. These methods should

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İsmail Bayram *e-posta/ e-mail: ismailbayram@ahievran.edu.tr*

be defined in a way that allows for reproduction by other researchers. For theoretical studies, previously derived formulas should be referenced, with each quantity explained; otherwise, the necessary derivations should be outlined (Kiss and Smith, 2020).

Within these studies, efficient use of time, energy, and other resources should be ensured, production processes should be approached with environmental sensitivity, and production costs should be minimized. Businesses that aim to remain competitive in the international arena without compromising environmental awareness can only achieve their goals through effective and controllable production process designs. To ensure the achievement of increasing environmental sensitivities, sustainability, and reduced resource consumption—essentially, the implementation of green production principles—industrial process designs must be functional and efficient, which is both a necessity and a responsibility to future generations. In this context, design and optimization studies aimed at maximizing efficiency while minimizing resource use during production are being carried out.

Ester compounds are widely used in the chemical industry as raw materials in various processes. Ethyl acetate and methyl acetate are among the most important and widely used esters of industrial significance. Esterification reactions are equilibrium-limited processes, and post-reaction, they typically require a series of separation steps. Reactive distillation solves this issue by combining chemical reactions and separation processes within a single unit, shifting the equilibrium towards product formation and increasing conversion and selectivity (Bayram and Günay, 2021).

Moraru et al. (2021) studied the production of methyl methacrylate, a key chemical used as a raw material for methacrylates and poly-methyl methacrylate. They conducted process simulations using Aspen Plus and Aspen Plus Dynamics to design and control the production process. The production flow diagram consisted of a fixed-bed reactor followed by three distillation columns, combined with a filtration unit. Their study demonstrated the technical feasibility, energy efficiency, and cost-effectiveness of the proposed process, requiring only 2.05 MJ/kg of methyl methacrylate and achieving a 99.7% carbon efficiency.

Similarly, Andres et al. (2020) designed a reactive distillation process for isobutyl acetate synthesis using a conceptual design methodology based on static and reactive residue curve analysis. The procedure comprised esterifying isobutanol with acetic acid in a heterogeneous catalytic system using Amberlyst 15 as a catalyst. Validated phase equilibrium and kinetic models served as the foundation for their design process. On the basis of predicted products, equilibrium lines, and residue curves, static analysis assisted in locating the reaction zone inside the column. In order to maximize conversion and produce high-purity isobutyl acetate, they determined the critical variables. By optimizing these variables, they were able to minimize energy and capital expenditures while maximizing economic potential. Their optimization reduced the production cost of isobutyl acetate to 0.98 USD/kg. While they concluded that pure isobutyl acetate could not be obtained as a top product from the reactive distillation column, they suggested that it could be obtained as a sufficiently pure bottom product to meet urethane-grade specifications.

Muthia et al. (2019) highlighted that, while reactive distillation offers significant benefits such as cost reduction and energy savings, research and development (R&D) processes often require extensive studies and rigorous simulations, making these tasks complex. To mitigate this complexity and reduce the time required, they proposed a novel graphical method to quickly gain insight into the applicability of reactive distillation for reversible quaternary systems. Using this graphical method, rapid results were obtained regarding the preliminary economic ranking of reactive distillation processes and optimum feed conditions with reduced energy requirements (i.e., lower reflux ratio). They also noted that the boiling point order of the components has significant effects on reactive distillation integration systems, and that the graphical method was highly useful for identifying regions where optimal feed conditions are achieved. For all groups they formed, they noted that shorter distances between the two feed inputs and the introduction of heavier reactants below lighter ones always resulted in benefits.

With an emphasis on tray columns, Bangga et al. (2018) examined the hydrodynamics of reactive and non-reactive distillation systems and evaluated the accuracy of computational fluid dynamics (CFD) simulations used to predict the flow behavior in tray systems. They studied the 25th tray in the methyl acetate production process in the reactive distillation system and used Aspen Plus V9.0 to simulate the tray's net liquid height as a function of tray shape and operating circumstances. For the manufacture of methyl acetate, they employed a 38-stage reactive distillation design and contrasted the outcomes with the outputs that were already produced. There were minor differences amongst the outcomes, but overall there was a fair amount of agreement. They contended that the

observed inconsistencies were caused by mass transfer effects and the turbulence-chemistry relationship. They demonstrated how these variables depend on flow behavior by visualizing the distributions of mole fractions, temperature, and reaction rates within particular ranges for the methyl acetate synthesis process using CFD simulations. Additionally, they examined the effects of superficial velocity, noting that as superficial velocity increased, so did the amplitude. They concluded that methyl acetate production was highly dependent on this variable, with an optimal value of approximately 0.6 m/s. In other words, the maximum product yield for methyl acetate and water was achieved at a superficial velocity of 0.6 m/s.

Sarma et al. (2016) used Aspen Plus software to control a reactive distillation column for maintaining the desired product purity. They employed a robust control scheme consisting of pressure, temperature, flow, composition, and reflux controllers. They found that the control structure applied for the design and control of the reactive distillation column in the methyl acetate system provided effective control, even in scenarios requiring high product purity. Due to the lack of direct control over product compositions, they reported that the setpoint of the temperature controller and the reflux ratio should be adjusted to overcome worst-case conditions. They suggested further studies by applying more advanced control systems, such as model predictive control (MPC).

2. Materials and Methods

2.1 Reactive distillation

Reactive distillation is a process in which the chemical reaction and the separation of products occur simultaneously within a single unit. The separation, purification, and reaction of the products happen concurrently in one unit. The design of reactive distillation columns is a complex process due to the interaction of numerous variables (Towler and Sinnott, 2008).

Table 1. Comparison of batch, semi-batch, and continuous distillation columns

Properties	Batch	Semi-batch	Continuous
Investment	Low	Medium	High
Flexibility	More flexible	More flexible	Less flexible
Single column for ternary mixing	Yes	Yes	No
Heat integration	No	No	Yes
Automatic control	Rarely	Partially	Oftenly
Efficiency	Low	Medium	High

In the past, reactive distillation has been successfully employed and investigated for a variety of reactions, including etherification, esterification, hydrogenation, hydrodesulfurization, and polymerization. The synthesis of methyl acetate via reactive distillation has been the subject of numerous studies. Methyl acetate is used as an intermediate in the production of various polyesters, including photographic film base, cellulose acetate, tenite cellulosic plastics, and estrone acetate. Table 1 provides a comparison of batch, semi-batch, and continuous distillation columns (Aqar, 2018).

2.2 Operating parameters of the reactive distillation process

The reactive distillation column consists of three sections: the stripping section, the reaction section, and the enriching section. Figure 1 shows the process flow diagram of the reactive distillation system. As depicted in the figure, acetic acid and methanol are continuously fed into the reaction section, and methyl acetate is obtained as the top product.

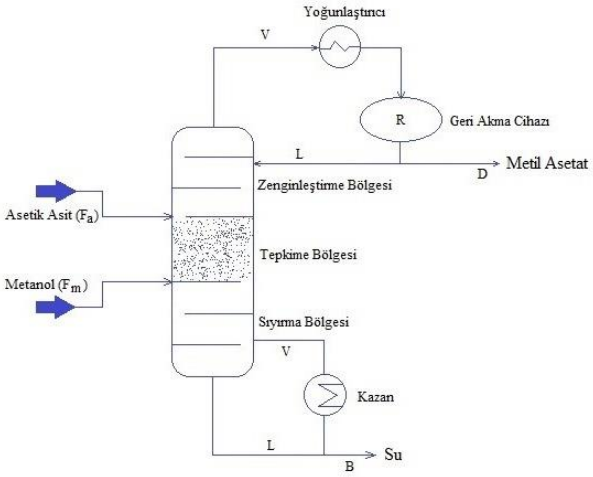


Figure 1. Process flow diagram of the reactive distillation system

In the design of the reactive distillation column, key variables that are considered crucial for the intended production process are selected based on design principles. These variables directly or indirectly affect the production process, and therefore, the most effective variables are determined by considering investment and operating costs. The design variables are listed below:

- Column operation mode (batch, semi-batch, continuous),
- Column type (packed or tray, fluidized bed),
- Properties of packing materials (in packed columns),
- Number of trays in the column,
- Physical properties of the column (pressure, temperature, etc.),
- Type of catalyst selected,
- Relative volatilities of the chemicals,
- Feed ratios and flow rates of the chemicals,
- Reflux ratio,
- Reboiler duty.

To better understand the interactions between the components, it is useful to know their physical properties. Table 2 provides some physical properties of the components (Yıldırım, 2020).

Table 2. Physically properties

Component	Molecule formule	Molecule weight (g/mol)	Boiling point (°C)
Acetic acide	$C_2H_4O_2$	60.05	118
Methanol	CH_4O	32.04	64.7
Methyl acetate	$C_3H_6O_2$	74.08	57
Water	H_2O	18.01	100

2.3 Process Design Using Chemcad

The esterification reaction between methanol and acetic acid leads to the production of methyl acetate as a product. In this theoretical study, simulations were performed using Chemcad version 6.5.7, a process simulation software developed by Chemstations. The focus was on simulating different operating conditions in a reactive distillation column where both the reaction and separation occur simultaneously. The primary goal of the design was to create an efficient system that ensures maximum yield with minimum resource utilization, balancing production costs and investment requirements. The system model for the simulation experiments consisted of feed lines for methanol and acetic acid, a reboiler, condenser, reflux unit, and collection lines for both top and bottom products. The process flow diagram for the reactive distillation column was designed in Chemcad and is shown in Figure 2.

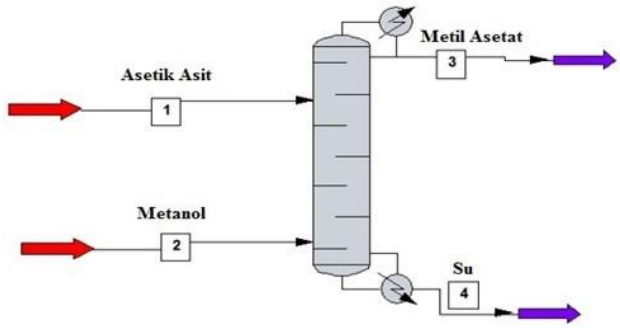


Figure 2. The process flow diagram for the reactive distillation column

The simulation of the reactive distillation column in Chemcad enabled the separation of methyl acetate as the top product and water as the bottom product through chemical reactions.

The elements of the reactive distillation column, along with their properties and the connections between the input-output streams, were defined in the software. Scanning was performed to determine which variables had the most significant impact on the efficiency of the reaction and distillation processes. Based on the literature, key design details were established, and simulation trials were evaluated to determine the operating ranges. The resulting values were incorporated into the system as the working principles of the simulation. Critical design elements, such as operating pressure, the number of stages, feed stages for acetic acid and methanol, and reflux ratio, were defined within the model, and the overall framework of the designed system was established. Table 3 provides numerical values for the characteristics of the reactive distillation column.

Table 3. The properties of reactive distillation column

Properties	Values
Column tray numbers	20
Acetic acid feeding stage	10
Methanol feeding stage	14
Range of reactive stage	10-14
Column pressure (kPa)	101

Simulating the reactive distillation column provides several advantages, including time and resource savings, the determination of the appropriate number of trays, the selection of optimal feed stages, obtaining high-purity chemicals, identifying priority reaction variables with the greatest impact on results, establishing the best operating conditions for the column, and improving process design to increase production efficiency (Ersingün, 2019).

3. Results and Discussions

The methods developed for reactive distillation were applied in theoretical studies using Chemcad and experimental design programs. Steady-state experiments were conducted in Chemcad for different input variables, and the working ranges were determined as follows: feed rate between 2.5-5, reflux ratio between 1-1.5, and feed temperature between 30-60 °C.

The simulation results revealed the temperature profile along the column. As expected, the temperature decreased from the reboiler to the condenser, but increased in the reaction zone (between stages 10 and 14) due to the exothermic nature of the reaction. The mass flow rates of the total vapor and total liquid phases throughout the column are presented in Table 4. It was observed that both liquid and vapor phase values significantly increased in the reaction zone.

Table 4. The mass flow rates of the total vapor and total liquid phases

Tray number	Temperature (˚C)	Liquid phase (kg/s)	Vapor phase (kg/s)
1	120.4	142.82	-
2	122.7	136.27	238.03
3	121.2	132.21	231.48
4	120.7	131.25	227.42
5	120.6	131.06	226.46
6	120.6	131.02	226.27
7	120.6	131.02	226.23
8	120.6	131.01	226.23
9	120.6	131.01	226.22
10	120.6	1418.20	226.22
11	113.2	1282.27	704.73
12	107.6	1197.69	568.80
13	103.1	1134.91	484.22
14	98.7	1247.25	421.44
15	105.1	1343.94	469.71
16	110.5	1431.42	566.40
17	114.0	1493.15	653.87
18	116.0	1530.74	715.60
19	117.1	1552.28	753.19
20	117.7	-	774.73

Table 5. Physical properties of the liquid phase

Tray number	Mass flow rate (kg/s)	Density (kg/m³)	Viscosity (cP)
1	143	593.97	0.1939
2	136	593.24	0.1945
3	132	596.51	0.1971
4	131	597.12	0.1978
5	131	597.24	0.1979
6	131	597.27	0.1980
7	131	597.27	0.1980
8	131	597.27	0.1980
9	131	597.27	0.1980
10	1418	597.27	0.1980
11	1282	606.74	0.2094
12	1198	613.77	0.2185
13	1135	619.47	0.2263
14	1247	625.14	0.2343
15	1344	616.88	0.2227
16	1431	610.09	0.2137
17	1493	605.71	0.2081
18	1531	603.22	0.2050
19	1552	601.86	0.2034
20	778	601.11	0.2035

Table 5 shows the numerical values for the physical properties of the liquid phase, including mass flow rates, density, and viscosity. Similarly, Table 6 presents the physical properties of the vapor phase, including mass and volumetric flow rates, viscosity, thermal conductivity, and surface tension.

Table 6. Physical properties of the vapor phase

Tray number	Mass flow rate (kg/s)	Density (kg/m³)	Viscosity (cP)
1	0	0	0
2	238	3.4980	0.0079
3	231	3.3187	0.0080
4	227	3.2755	0.0080
5	226	3.2669	0.0080
6	226	3.2653	0.0080
7	226	3.2650	0.0080
8	226	3.2649	0.0080
9	226	3.2649	0.0080
10	226	3.2649	0.0080
11	705	2.7149	0.0085
12	569	2.3991	0.0089
13	484	2.1854	0.0092
14	421	2.0060	0.0092
15	470	2.2782	0.0095
16	566	2.5566	0.0091
17	654	2.7671	0.0087
18	716	2.8996	0.0085
19	753	2.9766	0.0083
20	775	3.0203	0.0082

Figure 3 shows the temperature changes along the column. The changes in total vapor and total liquid phase balances during the distillation process are shown in Figures 4 and 5, respectively. As seen from these profiles, total vapor and liquid phases decreased from the reboiler to the condenser, while a noticeable increase in mass flow rates was observed in the reaction zone due to the expected rise in temperature.

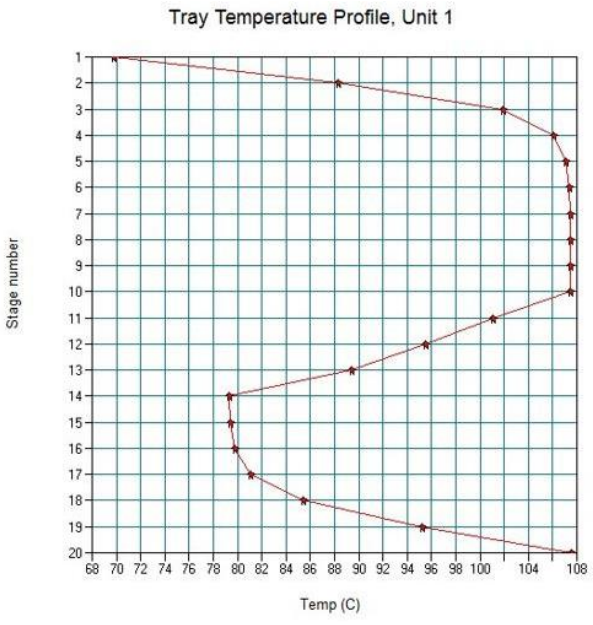


Figure 3. Temperature changes along the column

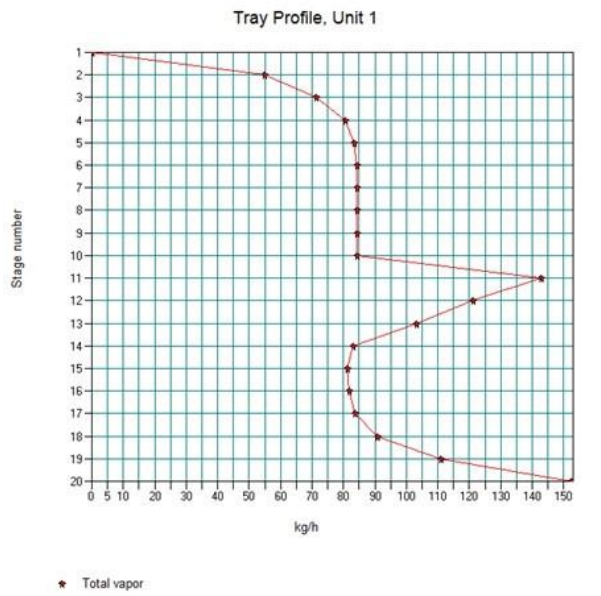


Figure 4. The changes in total vapor balances during the distillation process

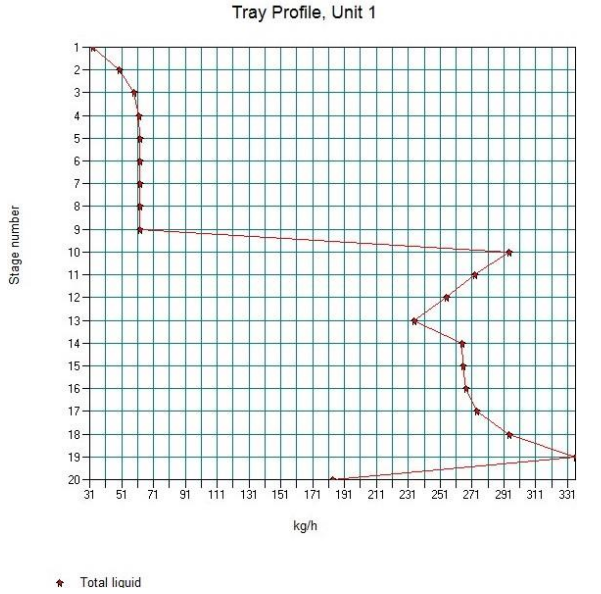


Figure 5. The changes in total liquid balances during the distillation process

4. Conclusions

The reactive distillation system is an integrated process where both the reaction and distillation occur together. Compared to traditional distillation methods, it has been determined that reactive distillation provides higher product yield. In this study, the effects of operating parameters—such as feed rate, reflux ratio, and feed temperature—on the yield of methyl acetate were observed in the simulated reactive distillation column.

As emphasized in the study by Ersingün (2019), esterification reactions are equilibrium-limited, and after the reaction, a series of separation steps is typically required. Reactive distillation eliminates this problem. By combining the chemical reaction and separation processes in a single unit, the equilibrium is shifted toward product formation, thereby increasing conversion and selectivity.

Similar to the findings of Muthia et al. (2019), the reactive distillation process achieved cost reductions and energy savings, with quick results regarding optimum feed conditions and reduced energy requirements (i.e., lower reflux ratio).

For the methyl acetate production process, the dependence of mole fractions, temperature, and reaction rate distributions on flow behavior was demonstrated. After the flow diagram structure was established, it was determined that a step-by-step approach was necessary to minimize total annual costs (Tang et al., 2005).

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

This study was carried out by Alper GÜNAY under the supervision of Assist. Prof. İsmail BAYRAM. It is derived from the master of thesis titled "Optimization of operating conditions using design expert methodology with dynamic simulation of reactive distillation column".

Credit Authorship Contribution Statement

Author 1: Conceptualization, Methodology, Validation, Resources, Writing – review and editing, Visualization, Supervision.
Author 2: Methodology, Software, Writing – original draft.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

5. References

Aldemir, A., Ersingün, D. and Bayram, İ., 2023, Dynamic simulation of a reactive distillation column for ethyl acetate production: optimization of operating conditions using response surface methodology, *Yuzuncu Yıl University Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences*, **27**, 365-379. https://doi.org/10.53433/yyufbed.1100522

Andrés, J. M., Juan M.P., Eugenia I. L., Asunción A. M. and José L. G. M, 2020. Disinfection enhancement of single ozonation by combination with peroxymonosulfate salt, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8 (5)**, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104335

Aqar, D.Y., 2018. Modelling and Optimization of Conventional and Unconventional Batch Reactive Distillation Processes, (PhD), University of Bradford, UK, 207.

Bangga, G., Novita, F.J. and Lee, H.Y., 2019, Evolutional computational fluid dynamics analyses of reactive

distillation columns for methyl acetate production process. *Chemical Engineering and Processing*, **135**, 42-52.
https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.11.015

Bayram, İ. ve Günay, A., 2021. Tepkimeli damıtma kolonunun dinamik simülasyonu ile deneysel tasarım yöntemi kullanılarak işletim koşullarının optimizasyonu, Yüksek Lisans, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, 54.

Ersingün, D., 2019. Dinamik benzetimi yapılan bir reaktif distilasyon kolonunun cevap yüzey yöntemi ile optimum işletme koşullarının belirlenmesi, Yüksek Lisans, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 92.

Kiss, A.A and Smith, R., 2020. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry, *Energy*, **203**, 1-27.
https://doi.org/10.1016/j.energy.117788

Moraru, M.D., Bildea, C.S., Kiss, A. A., 2021, Novel eco-efficient process for methyl methacrylate production, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **60 (3)**, 1-18.
https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04273

Muthia, R., Ham, A., Jobson, M. and Kiss, A. A., 2019, Effect of boiling point rankings and feed locations on the applicability of reactive distillation to quaternary systems, *Chemical Engineering Research and Design*, **145**, 184-193.
https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.014

Önder Yıldırım E., 2020. Tepkimeli bir damıtma kolonunun dolaylı kontrolü, Yüksek Lisans, Ankara Üniversitesi, 129.

Sarma, S.K., Singh, K. ve Dohare, R.K., 2016, Control of a reactive distillation column for methyl acetate system using Aspen Plus, International *Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, **4 (26)**, 12-16.
https://doi.org/10.19101/IJATEE.2017.426003

Tang, Y.T., Chen, Y.W., Huang, H.P. and Yu, C.C., 2005. Design of reactive distillations for acetic acid esterification, *AIChE Journal*, **51 (6)**, 1683 – 1699.
https://doi.org/10.1002/aic.10519

Towler, G. and Sinnott, R., 2008. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design, Butterworth-Heinemann (Elsevier), United States of America, 345-394.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1543956
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045703 (935-945)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045703 (935-945)

Al-Mg-Si Alaşımlarında Farklı MnCr Miktarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 06.09.2024
Kabul/Accepted: 20.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Investigation of the Effect of Different MnCr Amount on Mechanical and Microstructural Properties of Al-Mg-Si Alloys

Halil ULUPINAR[1*], Yiğit GÜLLER[1], Eren BOYACI[1], Yahya BOZKURT[2]

[1] *Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş. Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye*
[2] *Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, döküm ve homojenizasyon işlemleri sonrasında yüksek ve düşük MnCr içeriğine sahip Al-Mg-Si alaşımlarının farklı Mn ve Cr oranlarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, çeşitli Mn ve Cr oranlarına sahip biyetler dökülmüş ve ardından homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Homojenizasyon işlemi sonrasında üretilen bu alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için çekme testi, sertlik ölçümü, Optik Emisyon Spektrometresi ve Taramalı Elektron Mikroskobu analizleri yapılmıştır. Mikroyapı analizlerinde, yüksek MnCr içeriğinin daha homojen ve ince taneli bir yapı sağladığı gözlemlenmiştir. Homojenizasyon işlemi sonrasında, α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerinin yoğunluğu artmış ve bu dispersoidler mekanik özelliklerin iyileşmesine katkıda bulunmuştur. Mekanik test sonuçları yüksek Mn/Cr içeriğine sahip alaşımların daha yüksek akma ve çekme mukavemeti ile daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar Al-Mg-Si alüminyum alaşımlarının performansını optimize etmek için Mn ve Cr mikroalaşımlarının önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Alüminyum; Al-Mg-Si alaşımları; Dispersoidler; Çökeltiler; Homojenizasyon.*

Abstract

In this study, the effects of different Mn and Cr ratios on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys with high and low MnCr content after casting and homogenization processes were investigated. Within the scope of the study, billets with various Mn and Cr ratios were cast and then homogenization heat treatment was applied. Tensile testing, hardness measurement, Optical Emission Spectrometry (OES) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses were performed to evaluate the microstructural and mechanical properties of these alloys produced after homogenization. Microstructure analysis showed that higher MnCr content resulted in a more homogeneous and fine-grained structure. After homogenization, the density of α-Al(Mn,Cr)Si dispersoids increased and these dispersoids contributed to the improvement of mechanical properties. Mechanical test results showed that alloys with higher Mn/Cr content have higher yield and tensile strengths and higher hardness values. The obtained results emphasize the importance of Mn and Cr microalloys to optimize the performance of Al-Mg-Si aluminum alloys.

Keywords: *Aluminum; Al-Mg-Si alloys; Dispersoids; Precipitates; Homogenization.*

1. Giriş

Al-Mg-Si alaşımları (6xxx serisi) orta mukavemetli yapısal uygulamalar ve mimari kesitler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde de bu tür alaşımlara yönelik artan bir talep vardır. Çoğunlukla ekstrüzyon yöntemi ile üretilmelerinin yanı sıra levha ve plaka halinde de üretimleri gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte alaşımın mikroyapı özelliklerini iyileştirmek amacıyla az miktarda Mn ve Cr elementlerinin sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Yüksek sıcaklıkta (400-550°C) tavlama sırasında çeşitli kristalografik yapılara ve kimyasal bileşimlere sahip Mn ve Cr içeren farklı tipte çökeltiler oluşur. Mekanik özellikler üzerinde oldukça sınırlı bir doğrudan etkiye sahip olan bu tür çökeltiler genellikle dispersoidler olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, oldukça yüksek yoğunlukları ve yüksek termal kararlılıkları nedeniyle yeniden kristalleşme, tane büyüme süreçleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilmekte ve hatta güçlendirici çökeltilerin çökelmesi için çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket edebilmektedirler (Qian vd. 2019, Arriaga-Benitez ve Pekguleryuz 2023)

Alaşım olarak MnCr içeren Al-Mg-Si alaşımlarında dispersoidler α-Al(MnCr)Si fazı çökeltileri olarak adlandırılmaktadır (Wang vd. 2020, Ding vd. 2018, Hu vd. 2017). Bu tür dispersoidlerin nasıl oluştuğu uzun yıllardır

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Halil ULUPINAR e-posta/e-mail: halil_ulupinar@cuhadaroglu.com

araştırılmakla beraber henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Lodgaard vd (2000), α-Al matrisiyle dispersoidlerin düzensiz bir arayüzey yapısına sahip olması nedeniyle homojen çekirdeklenme oluşturmadığını belirtmişlerdir. Hirasawa (1975), ısıtma periyodu sırasında oluşan güçlendirici parçacıklar β'' ve β'-Mg_2Si iğnemsi tanelerinin, yüksek sıcaklıkta tavlama sırasında Mn içeren dispersoidler için çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket edebileceğine dair bazı kanıtlar sağlamıştır. Bununla birlikte plaka şekilli β-Mg_2Si taneleri çekirdeklenme bölgesi olarak incelenmiştir. Birçok araştırmacı (Li vd. 2021, An vd. 2020) tarafından dispersoidlerin alaşım içinde oldukça homojen olmayan bir dağılıma sahip olma eğilimi yapılan incelemeler sonucunda belirtilmiştir. Bu eğilimin tavlama prosedüründeki ayrıntılara da güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, homojenizasyon sırasındaki daha yavaş bir ısıtma hızının tekdüze bir dispersoid dağılımını teşvik ettiği gözlemlenmiştir (Li vd. 2021). An vd. (2020), Al-Mn alaşımlarında Si varlığının çökelme kinetiğini önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla, katılaşmadan sonra Si' nin homojen olmayan dağılımı, dispersoidlerin homojen olmayan dağılımından dolayı olabilmektedir (An vd. 2020). Al-Mg-Si alaşımlarında Fe, alaşım bileşimlerine bağlı olarak Al-Fe, Al-Fe-Si ve Al-Fe-Mn-Si intermetalik fazları olarak ortaya çıkan en yaygın safsızlıktır (Mulazimoglu vd. 1996). Fe'nin Al içindeki katı çözünürlüğü çok düşüktür. Bu nedenle ticari Al alaşımlarında her zaman birincil Fe taşıyan partiküller mevcuttur. Fe, Si ve Mn ilaveli 6xxx Al alaşımlarında, katılaşma sırasında β-AlFeSi, α-Al(FeMnCr)Si ve Mg_2Si partikülleri oluşmaktadır (Kuijpers vd. 2003, Mrówka-Nowotnik ve Sieniawski 2005). Döküm kütüğün mikroyapıları dendritiktir ve esas olarak dendrit kolları arasında β-AlFeSi fazı ve kaba Mg_2Si parçacıkları oluşturmaktadır. Söz konusu intermetalik partiküller biyetlerin ekstrüde edilebilirliği ve işlenebilirliği üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Li vd. 2014, Kujipers vd. 2002). β-AlFeSi fazındaki yeni başlayan ergime genellikle sıcak çatlamadan ve topaklanma gibi yüzey kusurlarından dolayı olduğu ve termo-mekanik işlemler sırasında kötü bir yüzey kalitesine yol açtığı bilinmektedir. İdeal biyet, minimum miktarda intermetalik β-AlFeSi plakaları ve Mg_2Si partikülleri ve biyet kesiti boyunca homojenlik ile tek tip tane yapısına sahip olmalıdır (Zajac vd. 1994). Daha iyi yüzey kalitesine sahip ekstrüde ürünler elde etmek için, döküm halindeki biyetler termo-mekanik işlemler öncesinde bir ısıl işlem prosedürü sırasında homojenize edilmelidir.

Bu çalışmada, farklı MnCr mikroalaşım oranlarına sahip Al-Mg-Si alaşımları doğrudan soğutma yöntemi ile dökülerek eşit şartlarda homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Döküm ve homojenizasyon ısıl işlemi sonrasında yapıda meydana gelen faz dönüşümlerinin ve dispersoidlerin dağılımının mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

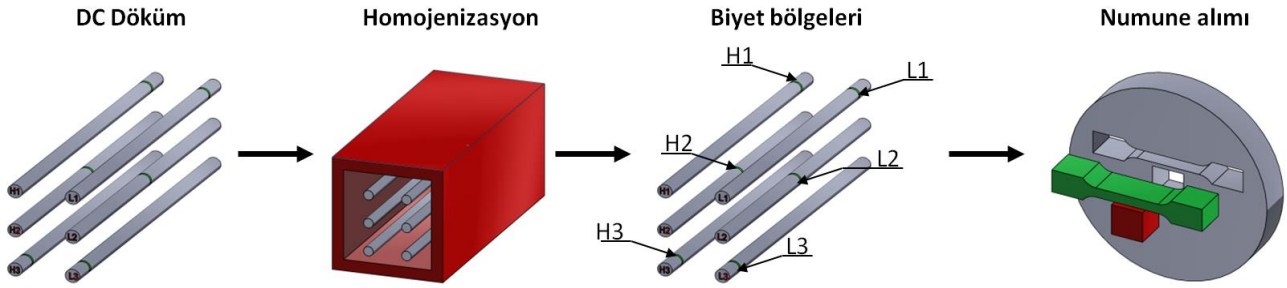
Farklı MnCr oranlarına sahip iki adet AA6005 alüminyum alaşımı doğrudan soğutmalı (DC) dikey döküm yöntemi ile üretilerek hazırlanmıştır. EN 573 standart değerleri içerisinde yer alan Al alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 1'de listelenmiştir.

Çizelge 1. AA6005 alaşımının EN 573 standartındaki ve deneysel çalışmalardaki kimyasal kompozisyonu.

Alaşım	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%	Mn+Cr%
Standart (EN 573)	0.50-0.90	0.35	0.3	0.5	0.40-0.70	0.3	0.2	0.1	0.12-0.50
H1 H2 H3	0.691	0.221	0.035	0.220	0.556	0.102	0.054	0.032	0.321
L1 L2 L3	0.673	0.239	0.041	0.115	0.584	0.027	0.107	0.033	0.143

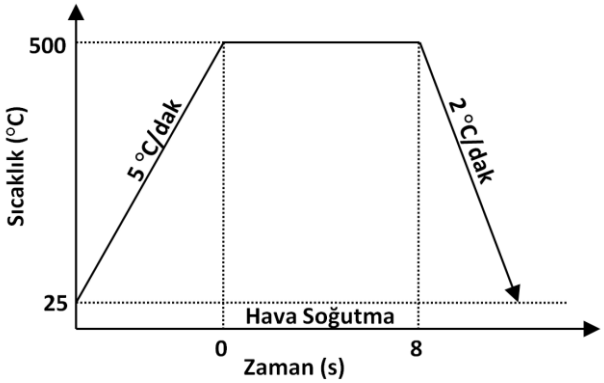
Deneysel çalışmada döküm işleminden numune alım aşamasına kadar olan süreç Şekil 1'de gösterilmektedir. Külçe formundaki AA6005 Al alaşımı 700 °C ila 750 °C arasındaki sıcaklıklarda ergitilmiştir. Bu sıcaklık aralığında alaşım elementleri saf metalik formda eklenmiştir. Alaşım elementlerinin sıvı alüminyum içerisine eklenmesinden sonra homojen bir dağılım için eriyik tamamen karıştırılmış ve eriyik yüzeyinde meydana gelen safsızlıklar giderilmiştir. Rafinasyon sıcaklığı 750 °C iken cüruf ve gazdan arındırma işlemi için heksakloroetan kullanılmıştır. Daha sonra eriyik 5 dakika süreyle muhafaza edilerek DC dikey döküm yöntemi ile 7 m uzunluğunda, 254 mm (10 inç) çapındaki biyetler halinde döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Döküm işlemleri sonrasında elde edilen farklı MnCr oranlarına sahip biyetler 5 °C/dak. ısıtma hızındaki fırında 8 saat boyunca 500 °C'de homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutularak 2 °C/dak. soğuma hızında fırın içerisinde kontrollü olarak soğutulmuştur.



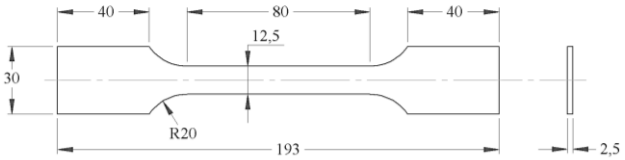
Şekil 1. Biyetlerin döküm sürecinden numune alım aşamasına kadar olan sürecinin şematik gösterimi.

Homojenizasyon ısıl işlem süreci Şekil 2'de şematik olarak gösterilmektedir. Homojenizasyon ısıl işleminden sonra fırının üst, orta ve alt kısmında bulunan biyetlerin sırasıyla baş, orta ve arka bölgelerinden 50 mm genişliğinde silindirik kesitler alınmıştır. Alınan kesitlerin orta kısmından dispersoidlerin gelişimini ve bunların oda sıcaklığında mekanik ve mikroyapısal etkilerini değerlendirmek için numuneler alınmıştır. Yüksek MnCr oranına sahip numuneler sırasıyla H1, H2 ve H3 şeklinde, düşük MnCr oranına sahip kesitler ise sırasıyla L1, L2, L3 şeklinde kodlanmıştır.



Şekil 2. Homojenizasyon ısıl işleminin şematik diyagramı.

Alaşımların elementel analizi GNR – Metal Lab Plus optik emisyon spektrometresi (OES) cihazında gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıyı incelemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve dalgaboyu dağılım spektrometresi (WDS) donatıları bulunan JEOL JSM 7000F taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Dispersoidlerin dağılımlarını SEM incelemesinde net bir şekilde gözlemlemek amacıyla, numuneler kademeli zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş, ardından yüzey alkol ile temizlenmiştir. Yüzey hazırlığının ardından numuneler %0.5 HF çözeltisi ile 90 saniye boyunca dağlanmış, distile su ile durulanmış ve son olarak alkol ile silinerek kurutulmuştur. Dispersoidlerin sayı yoğunluğunu Adobe Photoshop CS4 Extended kullanılarak belirlenmiştir. Sertlik testleri Brinell cinsinden DIGIROCK-RB makinesinde 2.5 mm çapında bilya, 62.5 kgf yük ve 7 saniye bekleme süresiyle parlatılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ortalama sertlik değeri her numune için 5 ölçüm noktasından elde edilmiştir. Çekme numuneleri Şekil 3'de gösterilen TS EN ISO 6892-1 standardında belirtilen ölçülerde kesilerek 8 mm/dak. çekme hızında Zwick/Roell marka, Z020 model ve 20 kN kapasiteli çekme testi cihazında oda sıcaklığı altında çekme testine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3. TS EN ISO 6892-1 standart ölçüleri (ISO 6892-1:2019).

3. Bulgular ve Tartışma

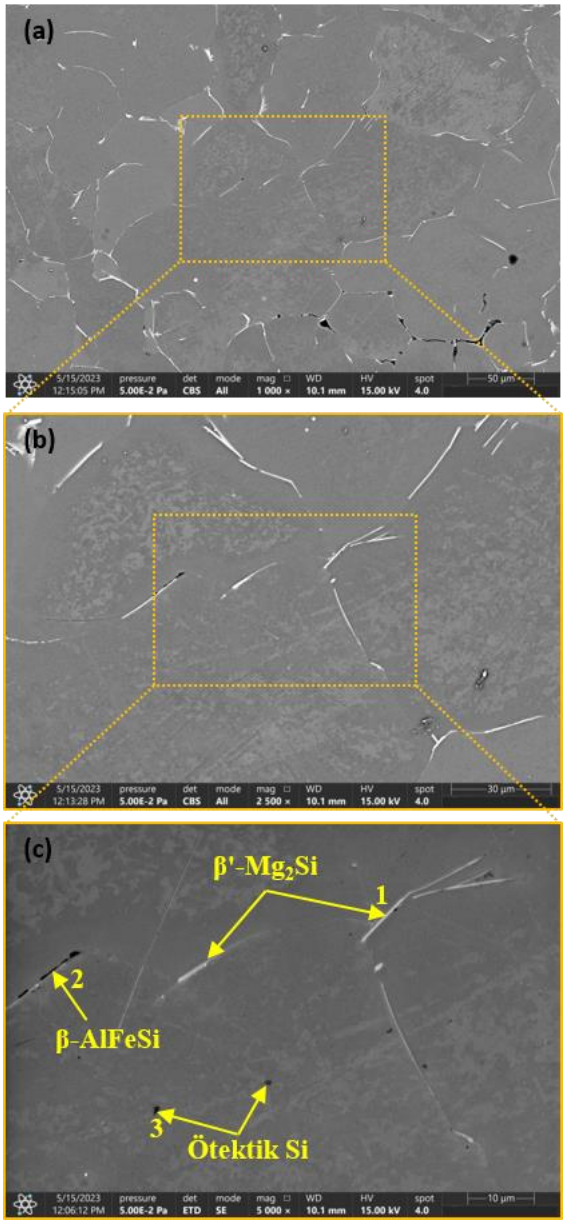
3.1 Mikroyapı Analizi

3.1.1 Döküm sonrası mikroyapı analizi

Şekil 4'de H1 numunesinin DC döküm sonrası SEM görüntüleri incelenmiştir. Al-Mg-Si biyetin mikroyapısının eşeksenli dentritik alüminyum matris taneleri ve β-AlFeSi, β^{l}-Mg_2Si intermetalik fazlardan oluştuğu görülmektedir. Yüksek ve düşük Mn-Cr alaşımına sahip alaşımların döküm sonrası mikroyapıları benzer sonuç sergilediği için H1 numunesinin sonuçları incelenmiştir. Şekil 4a-b'de dağlanmış numunenin 1000X ve 2500X büyütme oranındaki SEM görüntüleri incelendiğinde α-Al taneleri ve sınırlarında meydana gelen intermetalik fazlar gözlemlenmektedir. Bu fazların morfolojisi Şekil 4c'de 5000X büyütme altında incelendiğinde tane sınırlarında açık gri renkli β-AlFeSi ve koyu siyah renkli Mg_2Si intermetalik fazları dikkat çekmektedir (Jeon vd. 2022, Ling vd. 2022). β-AlFeSi parçacıkları, %99,8 saflığa sahip ham Al'deki Fe safsızlıkları nedeniyle esas olarak Al-Si-Mg bazlı alaşımlarda oluşmaktadır (Kim vd. 2006).

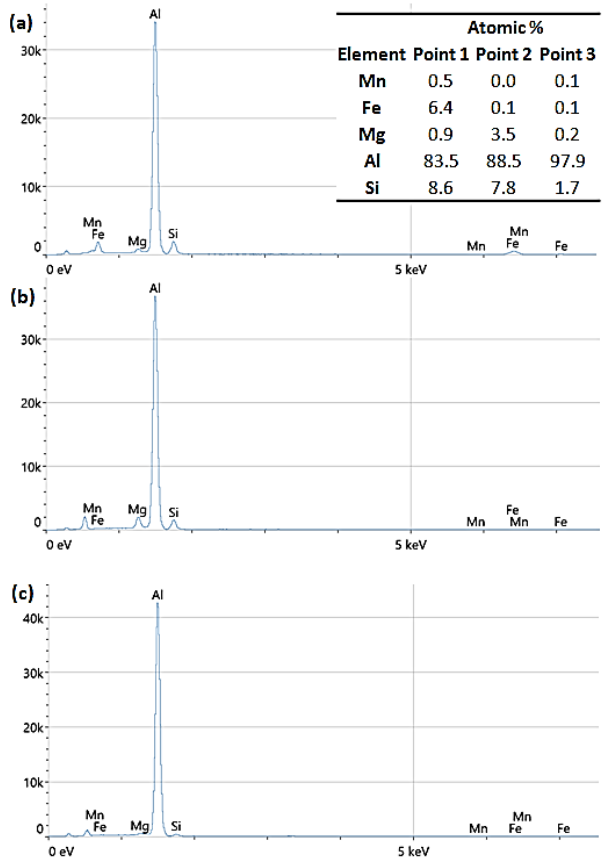
Zajac vd. (1994), Al-Mg-Si alaşımlarında döküm işlemi sonrası β-AlFeSi fazlarının sıklıkla meydana gelen intermetalikler olduğunu ve ekstrüzyon sonrası alaşımın

yüzey özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4. Döküm sonrası SEM sonuçları, a) 1000X büyütme oranında SEM görüntüsü, b) 2500X büyütme oranında SEM görüntüsü, c) 5000X büyütme oranında SEM görüntüsü ve EDS analizi için seçilen bölgeler.

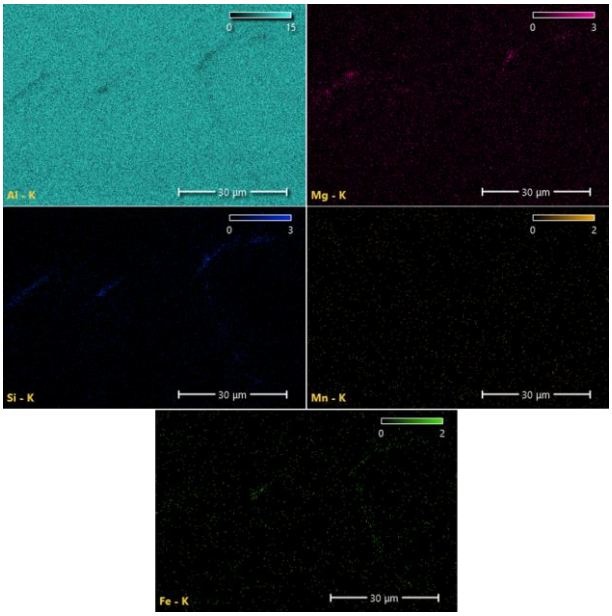
Belov vd. (2005), Mg ve Si elementlerinin β-AlFeSi intermetalik oluşumunda önemli bir etkiye sahip olduğunu ve yüksek oranda kullanılması durumunda yapıda $Al_{13}Fe_4$ fazını, düşük oranda kullanımı durumunda ise β-AlFeSi fazının baskın hale geldiğini belirtmiştir. Keskin kenar ve iğne benzeri bir morfolojiye sahip monoklinik yapılı β-AlFeSi fazının matris malzemesinde stres birikimine neden olduğu ve tane sınırlarında plaka şeklinde çökelen Mg_2Si miktarındaki artışın mekanik özellikleri iyileştirdiği ancak ekstrüzyon yapılabilirlik oranını azalttığı bilinmektedir (Wang vd. 1995, Onurlu 1993, Şendeniz 2006). Tane içlerinde ötektik Si çökeltileri dikkat çekmektedir (Wang vd. 2020, Jeon vd. 2022). Şekil 5a-c'de sırasıyla Şekil 4c'de belirtilen noktaların EDS grafik ve tablo sonuçları gösterilmektedir.



	Atomic %		
Element	Point 1	Point 2	Point 3
Mn	0.5	0.0	0.1
Fe	6.4	0.1	0.1
Mg	0.9	3.5	0.2
Al	83.5	88.5	97.9
Si	8.6	7.8	1.7

Şekil 5. DC döküm işlemi sonrası belirli bölgelerden alınan EDS analizi sonuçları, a) 1. bölge, b) 2. bölge, c) 3. bölge.

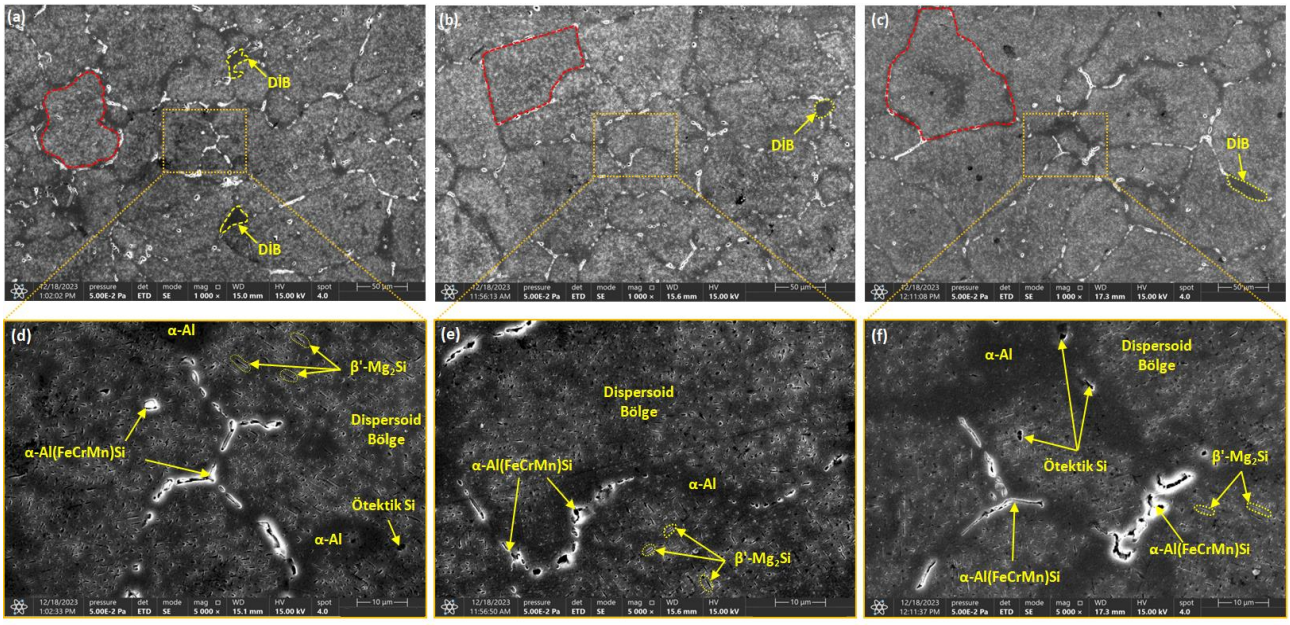
Şekil 6'da 2500X büyütme altında incelenen bölgenin element dağılımı gösterilmektedir. Element dağılımı dikkatli incelendiğinde plaka ve iğnemsi yapılardaki β-AlFeSi ile Mg_2Si intermetalik fazlarının olduğu alanlarda Mg, Si ve Fe elementleri yoğunluk göstermektedir.



Şekil 6. Al, Mg, Si, Mn ve Fe elementleri için X-Işını dağılım haritası.

3.1.2 Homojenizasyon sonrası mikroyapı analizi

Şekil 7'de yüksek MnCr oranına sahip H1, H2 ve H3 numunelerinin 1000X ve 5000X büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri gösterilmektedir. Kompozisyonlarında Mn ve Cr elementleri içeren Al-Mg-Si alüminyum alaşımları homojenizasyon ısıl işlemi sırasında çökeltiye uğrayarak α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerini oluşturduğu bilinmektedir (Loodgard ve Ryum 2000, Remøe vd. 2018). Döküm işlemi sonrasında gerçekleştirilen SEM analizi sonuçları ile kıyaslandığında dispersoid bölgerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 7a-c'de 1000X büyütme oranında ince tanelerle çevrelenen kaba taneler gözlemlenmektedir. Ortalama tane büyüklüğü 90 µm olarak belirlenmiştir. Açık renkli alanlar tane sınırlarında çökelen intermetalik fazları sergilerken tane içlerindeki gri alanlar ise dispersoid bölgeleri göstermektedir (Li vd. 2017, Du vd. 2013). Bir tanenin tane sınırları Şekil 7a-c'de gösterildiği gibi kırmızı kesikli çizgi ile vurgulanmıştır. Tane sınırlarının etrafında neredeyse hiç dispersoid gözlemlenmemiştir. Dispersoid içermeyen bölge (DİB) olarak sarı kesikli çizgi içerisinde belirtilen bu alanlar tane sınırlarının kesişim bölgesinde koyu renkli alanlar şeklinde incelenmiştir. Şekil 7a-c'de belirtilen gözlemin geçerliliğini doğrulamak için dağlanmış numunelerin 5000X büyütme oranında incelenen mikroyapıları Şekil 7d-f'de gösterilmektedir. Farklı bölgelerden alınan kesitlerin tamamında tane içlerindeki α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi (Wang vd. 2022, Alvarez-Antolin vd. 2020, Kumar vd. 2016), homojenleştirme ısıl işlemi iğne şeklindeki β-AlFeSi parçacıklarının daha küçük yuvarlak şekilli α-Al(FeCrMn)Si parçacıklarına dönüşümünü desteklemektedir. Homojenleştirme ısıl işlemi sonrasında ötektik Mg_2Si parçacıklarının çoğunluğu Al matrisinde çözünmüştür ancak poligonal şekilli Si parçacıkları (Şekil 7f) ve yuvarlak şekilli α-Al(FeCrMn)Si parçacıkları (Şekil 7d) mevcuttur. Şekil 4c'de belirtilen plaka şeklindeki β-AlFeSi fazı homojenleştirme ısıl işlemi sırasında iğnesel şekilli parçalara ayrılarak α-Al(FeCrMn)Si fazına dönüşmüştür (Gedik 2023). İğnesel şekilli β-Al(FeCrMn)Si çok kırılgandır ve düşük ötektik sıcaklık davranışı sergilemektedir. Bu durum termo-mekanik işlem sırasında nihai ürünün yüzeyinde süreksizlik oluşturduğu bilinmektedir. Yüzey probleminin yanı sıra termo-mekanik işlem kalıbının ömrü de düşük faz dönüşüm oranından etkilenmektedir. Ancak daha yüksek miktarda dönüştürülmüş α-AlFeSi daha iyi termo-mekanik işlenebilirlik ve daha iyi yüzey durumu sağlayarak kalıp ömrünü artıracaktır. İğne şeklinden yuvarlak şekle dönüşüm oranının minimum %95 olması hedeflenmektedir. Homojenizasyon işleminin ıslatma süresi boyunca tüm Mg ve Si atomları yüksek çözünürlükleri nedeniyle α-Al fazında çözünmekte ve homojen çözelti yapısı oluşturmaktadır (Fahri Ozdogru 2023). Soğutma işleminin amacı Mg ve Si atomlarını çözünmüş çözelti durumunda tutmaktır. Ancak yüksek soğutma hızlarında bile bu durum gerçekleşmemektedir. Sistemde her zaman düşük yüzdeli β-Mg_2Si bulunmaktadır (Fahri Ozdogru 2023).



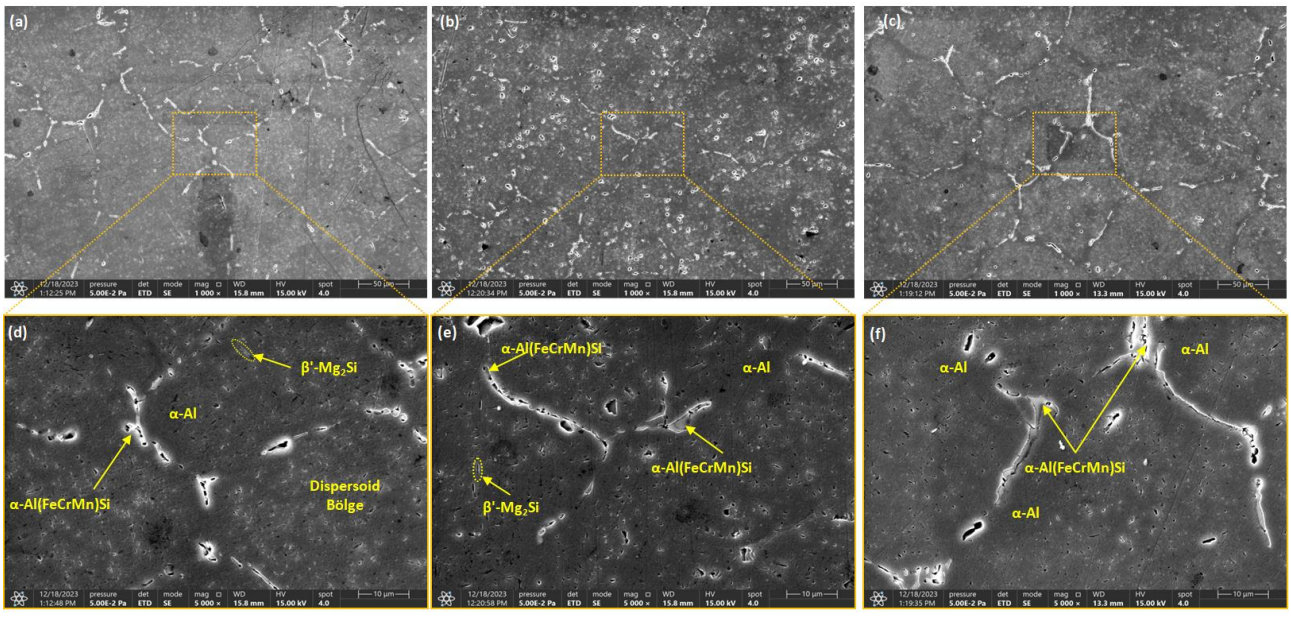
Şekil 7. Yüksek MnCr oranına sahip numunelerin SEM görüntüleri, a-c) 1000X büyütmede sırasıyla H1, H2, H3 numunelerinin SEM görüntüsü, d-e) 5000X büyütmede sırasıyla H1, H2, H3 numunelerinin SEM görüntüsü.

Şekil 8'de düşük MnCr oranına sahip L1, L2 ve L3 numunelerinin 1000X ve 5000X büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 8a-c'de 1000X büyütme oranındaki görüntüler incelenmiştir. Yapılan ölçüm sonucunda ortalama tane büyüklüğü 120 µm olarak belirlenmiştir. Şekil 8d-f'de 5000X büyütme oranındaki görüntüler incelendiğinde dispersoidlerin dağınık olarak yer aldığı dispersoid içermeyen bölgelerin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara göre (Khani Moghanaki vd. 2017, Xu vd. 2017), dispersoidlerin sıcak deformasyon ve deformasyon sonrası ısıl işlem sırasında toparlanmayı geciktirdiği ve yeniden kristalleşmeyi engellediği bilinmektedir. Dispersoidlerin dislokasyon hareketleri ve alt tane göçü üzerindeki sabitleme etkinliği büyük ölçüde boyutlarına ve hacim oranlarına bağlıdır. Bununla birlikte ince boyutlu ve yoğun dağılımlı dispersoidler yüksek sıcaklıklarda üstün mukavemete katkıda bulunabilmektedir (Nes vd. 1985). Daha düşük sıcaklıklarda (400-450 ˚C) daha ince dispersoidler elde edilebilmesine rağmen, Mg_2Si gibi kaba birincil fazlar α-Al matrisinde kalmıştır. Bu kaba birincil fazlar deformasyon sırasında tam olarak çözülemez ve yaşlandırma sertleştirmesi işleminden sonra daha zayıf bir alaşımla sonuçlanır (Liu vd. 2012). Ayrıca, çözünmemiş Mg_2Si fazları, sıcak deformasyon sırasında yeni başlayan erimeye neden olma eğilimindedir ve alaşımların verimliliğini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Qin vd. 2022). Tane yapısında büyük miktarda ince dispersoidlerin varlığının, sıcak deformasyon ve sonraki ısıl işlemler sırasında yeniden kristalleşme direncini önemli ölçüde artıran daha yüksek bir Zener sürükleme (P_Z) değeri ile sonuçlandığı bilinmektedir (Xu vd. 2017). Genel olarak, bu dispersoidlerin tane sınırlarını sabitleme etkinliği büyük ölçüde boyutlarına ve hacim oranlarına bağlıdır (Nes vd. 1985).

Küçük fakat yakın dağılmış dispersoidler tane büyümesi sırasında tane sınırlarını sabitleyerek tanelerin hareket etmesini engellemektedir (Goik vd. 2023). Dispersoidlerin yeniden kristalleşmeyi önlemedeki etkinliği Eşitlik 1'de verilmiştir (Guo vd. 2015, Lai vd. 2014):

$$P_Z = \frac{3\gamma^{GB} f}{2r} \quad (1)$$

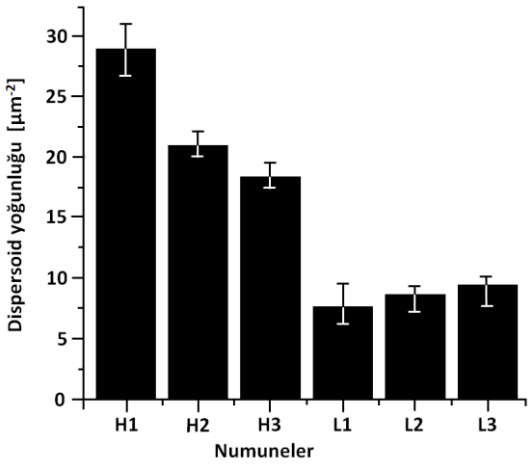
Burada γ^{GB} tane sınırı enerjisini, f hacim oranını ve $2r$ ortalama tane yarıçapına sahip eşit dağılımlı küresel tanelerini ve P_Z ise Zener sürükleme mekanizması olarak adlandırılan sabitleme basıncını ifade etmektedir. Sabitleme basıncı artan Mn/Cr oranı ile artmakta ve Mn/Cr oranı 3,5 değerini aştığında ise azalmaktadır (Liu vd. 2022).



Şekil 8. Düşük MnCr miktarına sahip numunelerin SEM görüntüleri, a-c) 1000X büyütmede sırasıyla L1, L2, L3 numunelerinin SEM görüntüsü, d-e) 5000X büyütmede sırasıyla L1, L2, L3 numunelerinin SEM görüntüsü.

Şekil 9'da yüksek ve düşük MnCr alaşımlarına ait dispersoid yoğunluk grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde yüksek MnCr içeriğine sahip H1, H2, H3 alaşımlarının düşük MnCr içeriğine sahip L1, L2, L3 alaşımlarından ortalama %165 oranında daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Strobel vd. (2010), yaptıkları bir çalışmada dispersoid yoğunluğunun MnCr alaşım oranı ve homojenleştirme ısıl işlemi koşulları tarafından

belirlendiğini ve artan MnCr oranı ile homojenizasyon sıcaklığının dispersoid yoğunluğunun artmasına neden olduğunu bildirmiştir. Bu durum artan MnCr içeriği ile birlikte dispersoid yoğunluğunun artmasının yanı sıra bir faz geçişinin de olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Yüksek ve düşük MnCr alaşımlarının dispersoid yoğunlukları.

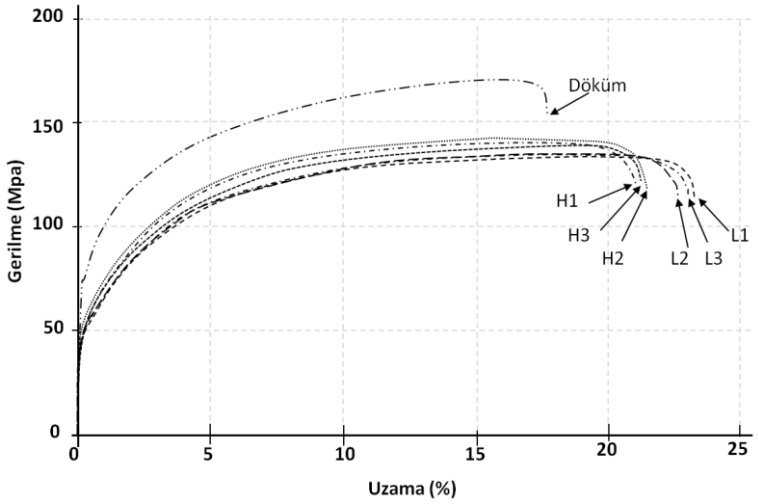
3.2 Mekanik Test Sonuçları

Homojenizasyon işleminden sonra yüksek ve düşük MnCr içeriğine sahip alaşımlardaki dispersoid yoğunluklarının mekanik özellikler üzerindeki ana etkileri, yeniden kristalleşmeyi engellemek, tane sınırlarındaki gerilme konsantrasyonunu azaltmak ve Orawan sertleşmesini sağlamaktır (Ding vd. 2024). Mevcut çalışmada dispersoid yoğunluğunun daha fazla olduğu H1, H2, ve H3 numunelerinde tane boyutunda önemli ölçüde bir azalma ile birlikte tane sınırlarının göçü engellenmiştir. Dispersoid kaynaklı akma dayanımı artışı genellikle Orowan bypass denklemi kullanılarak tahmin edilmektedir. Orowan bypass denklemi Eşitlik 2'de ve dispersoid parçacıklar arası boşluk denklemi Eşitlik 3'de verilmiştir (Liu vd. 2022, Guo vd. 2002).

$$\Delta\sigma = \frac{0.84MGb}{2\pi(1-v)^{1/2}\lambda}\ln\frac{r}{b} \quad (2)$$

$$\lambda = r\left(\frac{2\pi}{3f}\right)^{1/2} \quad (3)$$

Bu ifadelerde M alüminyum Taylor faktörünü (3.06), G Yüzey Merkezli Kübik (YMK) yapılı alüminyum için kayma modülünü (25.4 GPa), b alüminyum Burgers vektörünü (0.286 nm), v alüminyum için Poisson oranını (0.34), λ dispersoid parçacıklar arası boşluğu, f dispersoid hacim oranını ve r dispersoid ortalama yarıçapını ifade etmektedir (Ding vd. 2024). Zhao vd. (2013), yüksek yoğunlukta ince dispersoidlerin varlığının malzemeleri önemli ölçüde güçlendirdiğini ancak güçlendirme etkilerinin gerinim arttıkça azaldığını, parçacıklardan kaynaklanan iç gerilmenin erken deformasyon sırasında deformasyon sertleşmesine katkıda bulunduğunu bildirmiştir. Çalışmamızda, Mn ve Cr'nin birleşik etkisinin bir sonucu olarak H1, H2, H3 numunelerinin yüksek dispersoid yoğunluğuna sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum tane sınırlarındaki gerilme konsantrasyonunun etkili bir şekilde azaltılmasıyla sonuçlanmakta ve bu da bugüne kadar rapor edilen 6xxx alüminyum alaşımlarının çoğunda gözlemlenenden daha yüksek bir mukavemet-uzama kombinasyonu üretmektedir.



Şekil 10. Homojenizasyon işlemi sonrası yüksek (H1, H2, H3) ve düşük (L1, L2, L3) MnCr miktarına sahip alaşımların ve döküm durumundaki H1 alaşımının oda sıcaklığındaki çekme testi sonucu grafikleri.

Şekil 10'da döküm durumundaki numunenin ve yüksek MnCr içeriğine sahip H1, H2, H3 ve düşük MnCr içeriğine sahip L1, L2, L3 numunelerinin homojenizasyon ısıl işlemi sonrası gerilme-gerinim eğrileri gösterilmektedir. Farklı MnCr içeriğine sahip alaşımların akma dayanımı incelendiğinde yüksek MnCr içeren alaşımların ortalama akma mukavemetinin düşük MnCr içeren alaşımlara kıyasla %6 oranında arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte

düşük MnCr içeriğine sahip alaşımların ortalama %uzama değerleri düşük MnCr içeriğine sahip alaşımlara kıyasla %8 oranında artış sergilemektedir. Maksimum çekme mukavemeti yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımlarda %3 oranında artış göstermektedir. Liu vd. (2022), dispersoidlerin akma, kopma ve sertlik özellikleri üzerindeki etkisi sınırlı olsa da, sıcak deformasyon ve ardından gerçekleştirilecek olan çözelti ısıl işlemi sırasında alt yapıları etkili bir şekilde rafine ederek alaşımların sünekliğini arttırdığını belirtmişlerdir.

Alaşımların oda sıcaklığındaki çekme ve sertlik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 2'de listelenmiştir. Numunelerin beş ayrı noktasından alınan Brinell sertlik sonuçlarının ortalaması incelendiğinde yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımların %6 oranında daha sert bir yapı sergilediği görülmektedir. Döküm durumundaki numunenin mekanik özellikleri incelendiğinde ise akma, çekme ve sertlik değerlerinin daha yüksek, %uzama değeri ise belirgin oranda daha düşük sünek davranış sergilemiştir.

Çizelge 1. Alaşımların oda sıcaklığındaki çekme ve sertlik testi sonuçları.

Numune	Akma R_p 0.2 [Mpa]	Maks. Çekme R_m [Mpa]	Uzama A_{50} mm [%]	Sertlik [HRB]
H1	52,0	140	20,7	33
H2	54,0	142	21,2	34
H3	51,0	138	21,1	32
$H_{ort.}$	52,3	140	21,0	33
L1	49,0	135	23,0	31
L2	50,0	137	22,3	30
L3	49,0	133	22,8	32
$L_{ort.}$	49,3	135	22,7	31
Döküm	81,0	169,0	17,3	43

4. Sonuçlar

Bu çalışmada döküm ve homojenizasyon sonrası yüksek ve düşük MnCr içeriğine sahip biyetler incelenmiştir. Fırına aynı anda şarj edilen farklı konumdaki biyetler aynı homojenleştirme koşullarına tabi tutulmuştur. Farklı oranlarda Mn ve Cr mikro alaşımlarının malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Alaşımdaki yüksek MnCr içeriği malzemenin akma mukavemetini %6, kopma mukavemetini %3, sertlik değerini %6 oranında arttırırken, sünekliğini %8 oranında azaltmıştır.
- SEM-EDS analizlerinde döküm numunesinde matris α-Al, tane sınırları β-AlFeSi ve Mg_2Si fazları tespit edilmiştir. Koyu renkleri β-AlFeSi fazı, açık renkleri ise Mg_2Si fazının temsil ettiği görülmüştür.
- Homojenizasyon işlemi sonrasında, yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımlarda α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerinin yoğunluğu düşük MnCr içeriğine sahip alaşımlara oranla ortalama %165 oranında artmıştır. Bu dispersoidlerin varlığı, mikroyapının daha homojen olmasına ve mekanik özelliklerin iyileşmesine katkı sağlamıştır.
- Mekanik test sonuçlarına göre, yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımlar, düşük MnCr içeriğine sahip olanlara kıyasla daha yüksek akma ve çekme mukavemeti sergilemiştir. Bu durumun başlıca nedeni tane incelmesine neden olan ve tane sınırlarında gerilme konsantrasyonunun azalmasına katkıda bulunan yüksek dispersoid yoğunluğunun varlığıdır.
- Sertlik testleri, yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımların daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, mikroyapısal incelemelerle uyumlu olarak dispersoidlerin malzeme üzerinde olumlu etkilerini göstermektedir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı ısıl işlem parametrelerinin ve MnCr oranlarının daha detaylı incelenmesi ile bu alaşımların performansı değerlendirilebilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 4: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu araştırma Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş Ar-Ge Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

Qian, X., Parson, N., and Chen, X.-G., 2019. Effects of Mn addition and related Mn-containing dispersoids on the hot deformation behavior of 6082 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **764**, 138253. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138253

Arriaga-Benitez, R. I., and Pekguleryuz, M., 2023. The synergistic effects of nano-sized α-Al(Mn,Cr,Fe)Si and Al–Si–Zr dispersoids on the creep behavior Al–Si–Mg–Cu (Mn, Cr, Zr) diesel engine alloy. *Materials Science and Engineering: A,* **872**, 144949. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144949

Wang, X., Qin, J., Nagaumi, H., Wu, R., and Li, Q., 2020. The Effect of α-Al(MnCr)Si Dispersoids on Activation Energy and Workability of Al-Mg-Si-Cu Alloys during Hot Deformation. *Advances in Materials Science and Engineering,* **2020(1)**, 1-12 https://doi.org/10.1155/2020/3471410

Ding, L., Jia, Z., Nie, J.-F., Weng, Y., Cao, L., Chen, H., Wu, X., and Liu, Q., 2018. The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy. *Acta Materialia,* **145,** 437–450. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.036

Hu, J., Teng, J., Ji, X., Fu, D., Zhang, W., and Zhang, H., 2017. Enhanced mechanical properties of an Al-Mg-Si alloy by repetitive continuous extrusion forming process and subsequent aging treatment. *Materials Science and Engineering: A,* **695,** 35–44. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.013

Hirasawa, H., 1975. Precipitation process of Al-Mn and Al-Cr supersaturated solid solution in presence of age hardening phases. *Scripta Metallurgica,* **9(9)**, 955–958. https://doi.org/10.1016/0036-9748(75)90551-7

Li, Z., Qin, J., Zhang, H., Wang, X., Zhang, B., and Nagaumi, H., 2021. Improved Distribution and Uniformity of α-Al(Mn,Cr)Si Dispersoids in Al-Mg-Si-Cu-Mn (6xxx) Alloys by Two-Step Homogenization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **52(8)**, 3204–3220. https://doi.org/10.1007/s11661-021-06243-3

An, Z., Yang, W., Zhan, H., Hu, B., Wang, Q., Matsumura, S., and Sha, G., 2020. On the strengthening effect of Al-Cr-Si dispersoid in an Al-Si-Mg-Cu casting alloy with Cr addition. *Materials Characterization*, **166**, 110457. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110457

Mulazimoglu, M. H., Zaluska, A., Gruzleski, J. E., and Paray, F., 1996. Electron microscope study of Al-Fe-Si intermetallics in 6201 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A,* **27(4)**, 929–936. https://doi.org/10.1007/bf02649760

Kuijpers, N.C.W., Vermolen F.J., Vuik, K., and Zwaag, S., 2003. A Model of the β-AlFeSi to α-Al(FeMn)Si Transformation in Al–Mg–Si Alloys. *Materials Transactions,* **44(7),** 1448-1456. https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1448

Mrówka-Nowotnik, G., and Sieniawski, J., 2005. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology,* **162–163**, 367–372. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.115

Li, J. H., Wimmer, A., Dehm, G., and Schumacher, P., 2014. Intermetallic phase selection during homogenization for AA6082 alloy. *Philosophical Magazine*, **94(8)**, 830–846. https://doi.org/10.1080/14786435.2013.868943

Kuijpers, N. C. W., Kool, W. H., Koenis, P. T. G., Nilsen, K. E., Todd, I., and van der Zwaag, S., 2002. Assessment of different techniques for quantification of α-Al(FeMn)Si and β-AlFeSi intermetallics in AA 6xxx alloys. *Materials Characterization*, **49(5)**, 409–420. https://doi.org/10.1016/s1044-5803(03)00036-6

Zajac, S., Hutchinson, B., Johansson, A., and Gullman, L.-O., 1994. Microstructure control and extrudability of Al–Mg–Si alloys microalloyed with manganese. *Materials Science and Technology,* **10(4)**, 323–333. https://doi.org/10.1179/mst.1994.10.4.323

TS EN ISO 6892-1 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019) https://doi.org/10.3403/30395181

Jeon, J., Lee, S., Kyeong, J., Shin, S., and Kang, H., 2022. Effect of Geometrical Parameters of Microscale Particles on Particle-Stimulated Nucleation and Recrystallization Texture of Al-Si-Mg-Cu-Based Alloy Sheets. *Materials,* **15(22)**, 7924. https://doi.org/10.3390/ma15227924

Ling, H., Shi, H., Du, X., Zan, J., and Liu, J., 2022. Effect of chromium content on microstructure and properties of casting Al-7Si-0.35Mg-0.02Sr alloy. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik,* **53(10)**, 1229–1241. https://doi.org/10.1002/mawe.202200071

Kim, H. Y., Park, T. Y., Han, S. W., and Lee, H. M., 2006. Effects of Mn on the crystal structure of α-Al(Mn,Fe)Si particles in A356 alloys. *Journal of Crystal Growth,* **291(1)**, 207–211. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.02.006

Zajac, S., Hutchinson, B., Johansson, A., and Gullman, L.-O., 1994. Microstructure control and extrudability of Al–Mg–Si alloys microalloyed with manganese. *Materials Science and Technology,* **10(4)**, 323–333. https://doi.org/10.1179/mst.1994.10.4.323

Belov, N.A., Eskin, D.G., and Aksenov, A.A., 2005. Multicomponent phase diagrams: Applications for commercial aluminium alloys. Elsevier, 1-95

Wang, L., Makhlouf, M., and Apelian, D., 1995. Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships. *International Materials Reviews,* **40(6)**, 221–238. https://doi.org/10.1179/095066095790151133

Onurlu, S., 1993. Homojenizasyonun AA 6063 Alüminyum Alaşımının İçyapısı ve Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye, 70-75.

Şendeniz, M., 2006. Seçilen bir Al-Mg-Si alaşımının (AlMgSi0.5; etial 60) ısıl işlemlerle özellik değişimlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Türkiye, 80-83.

Wang, D., Zhang, X., Nagaumi, H., Li, X., and Zhang, H., 2020. 3D morphology and growth mechanism of cubic α-Al(FeMnCr)Si intermetallic in an Al-Si cast alloy. *Materials Letters*, **277**, 128384. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128384

Jeon, J., Lee, S., Kyeong, J., Shin, S., and Kang, H., 2022. Effect of Geometrical Parameters of Microscale Particles on Particle-Stimulated Nucleation and Recrystallization Texture of Al-Si-Mg-Cu-Based Alloy Sheets. *Materials,* **15(22)**, 7924. https://doi.org/10.3390/ma15227924

Lodgaard, L., and Ryum, N., 2000. Precipitation of dispersoids containing Mn and/or Cr in Al–Mg–Si alloys. *Materials Science and Engineering: A,* **283(1–2)**, 144–152. https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00734-6

Remøe, M. S., Westermann, I., and Marthinsen, K., 2018. Characterization of the Density and Spatial Distribution of Dispersoids in Al-Mg-Si Alloys. *Metals,* **9(1)**, 26. https://doi.org/10.3390/met9010026

Liu, K., and Chen, X.-G., 2015. Development of Al–Mn–Mg 3004 alloy for applications at elevated temperature via dispersoid strengthening. *Materials & Design,* **84,** 340–350. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.140

Li, Y. J., and Arnberg, L., 2003. Quantitative study on the precipitation behavior of dispersoids in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization. *Acta Materialia,* **51(12)**, 3415–3428. https://doi.org/10.1016/s1359-6454(03)00160-5

Li, Z., Zhang, Z., and Chen, X.-G., 2017. Microstructure, elevated-temperature mechanical properties and creep resistance of dispersoid-strengthened Al-Mn-Mg 3xxx alloys with varying Mg and Si contents. *Materials Science and Engineering: A,* **708**, 383–394. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.013

Du, Q., Poole, W. J., Wells, M. A., and Parson, N. C., 2013. Microstructure evolution during homogenization of Al–Mn–Fe–Si alloys: Modeling and experimental results. *Acta Materialia,* **61(13)**, 4961–4973. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.050

Wang, M., Guo, Y., Wang, H., and Zhao, S., 2022. Characterization of Refining the Morphology of Al–Fe–Si in A380 Aluminum Alloy due to Ca Addition. *Processes*, **10(4)**, 672. https://doi.org/10.3390/pr10040672

Alvarez-Antolin, F., Asensio-Lozano, J., Cofiño-Villar, A., and Gonzalez-Pociño, A., 2020. Analysis of Different Solution Treatments in the Transformation of β-AlFeSi Particles into α-(FeMn)Si and Their Influence on Different Ageing Treatments in Al–Mg–Si Alloys. *Metals*, **10(5)**, 620. https://doi.org/10.3390/met10050620

Kumar, S., Grant, P. S., and O'Reilly, K. A. Q., 2016. Evolution of Fe Bearing Intermetallics During DC Casting and Homogenization of an Al-Mg-Si Al Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **47(6)**, 3000–3014. https://doi.org/10.1007/s11661-016-3451-5

Gedik, B., 2023. Alüminyum Alaşımlarında Homojenizasyon Isıl İşleminin Malzeme Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye, 44-45.

Fahri Ozdogru, E., 2023. The Effect of Chemical Composition on EN AW 6XXX Series Aluminum Alloys. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*. 6-12 https://doi.org/10.5772/intechopen.110218

Khani Moghanaki, S., Kazeminezhad, M., and Logé, R., 2017. Effect of concurrent precipitation on the texture evolution during continuous heating of multi directionally forged solution treated Al-Cu-Mg alloy. *Materials Characterization,* **131,** 399–405. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.07.033

Xu, Y., Nagaumi, H., Han, Y., Zhang, G., and Zhai, T., 2017. The Deformation Behavior and Microstructure Evolution of a Mn- and Cr-Containing Al-Mg-Si-Cu Alloy During Hot Compression and Subsequent Heat Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A,* **48(3)**, 1355–1365. https://doi.org/10.1007/s11661-016-3881-0

Nes, E., Ryum, N., and Hunderi, O., 1985. On the Zener drag. *Acta Metallurgica,* **33(1)**, 11–22. https://doi.org/10.1016/0001-6160(85)90214-7

Liu, S. D., Yuan, Y. B., Li, C. B., You, J.H., and Zhang, X. M., 2012. Influence of cooling rate after homogenization on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy 7050. *Metals and Materials International,* **18(4)**, 679–683. https://doi.org/10.1007/s12540-012-4016-9

Qin, J., Nagaumi, H., Yu, C., Liu, F., Li, Y., and Wang, L., 2022. Coarsening behavior of Mg_2Si precipitates during post homogenization cooling process in Al-Mg-

Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds,* **902**, 162851. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162851

Goik, P., Schiffl, A., & Höppel, H. W. (2023). Formation of Peripheral Coarse Grain in Thin-Walled Al–Mg–Si Extrusion Profiles. Metallurgical and Materials Transactions A, **54(10)**, 3940–3956. https://doi.org/10.1007/s11661-023-07144-3

Guo, Z., Zhao, G., and Chen, X.-G., 2015. Effects of two-step homogenization on precipitation behavior of Al3Zr dispersoids and recrystallization resistance in 7150 aluminum alloy. *Materials Characterization,* **102**, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.016

Lai, J., Shi, C., and Chen, X.-G., 2014. Effects of V addition on recrystallization resistance of 7150 aluminum alloy after simulative hot deformation. *Materials Characterization,* **96**, 126–134. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.07.028

Liu, F., Zhu, X., Qin, J., Zhou, W., Ling, J., Dong, Q., Yu, J., Nagaumi, H., and Zhang, B., 2022. Effect of Mn/Cr ratio on precipitation behaviors of α-Al(FeMnCr)Si dispersoids and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **860**, 144269. https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144269

Strobel, K., Sweet, E., Easton, M., Nie, J. F., & Couper, M. 2010. Dispersoid Phases in 6xxx Series Aluminium Alloys. Materials Science Forum, **654–656**, 926–929. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.654-656.926

Ding, L., Zhang, X., Lu, C., Wang, C., Weng, Y., Dong, Q., Xu, S., Cao, L., & Jia, Z. 2024. Influence of the combined additions Mn, Cr or Ni on the formation of dispersoids and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu alloys. Materials Science and Engineering: A, **892**, 145962. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145962

Guo, Z., & Sha, W. 2002. Quantification of Precipitation Hardening and Evolution of Precipitates. Materials Transactions, **43(6)**, 1273–1282. https://doi.org/10.2320/matertrans.43.1273

Zhao, Q., Holmedal, B., & Li, Y. 2013. Influence of dispersoids on microstructure evolution and work hardening of aluminium alloys during tension and cold rolling. Philosophical Magazine, **93(22)**, 2995–3011. https://doi.org/10.1080/14786435.2013.794315

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1579340
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045801 (946-955)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045801 (946-955)

Assessing Boundary Shifts at Gölcük Lake (Kütahya) with Google Earth Images

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 04.10.2024
Kabul/Accepted: 28.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Google Earth Görüntüleri ile Gölcük Gölü (Kütahya) Sınır Değişimlerinin Değerlendirilmesi

Enes ZENGİN[1*], Recep Uğur ACAR[2], Ali Samet ÖNGEN[2]

[1] *Istanbul Technical University, Faculty of Mines, Department of Geological Engineering, Istanbul, Türkiye*
[2] *Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Kütahya, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Abstract

Climate change is one of the most pressing issues facing the world today, with far-reaching impacts on ecosystems, human health, and global economies. It is characterized by significant alterations in temperature, precipitation patterns, and the frequency of extreme weather events, largely driven by human activities such as deforestation, industrial emissions, and the intense use of fossil fuels. United Nations has introduced a collective approach through the Sustainable Development Goals (SDGs), a set of 17 global goals adopted in 2015 as part of the 2030 Agenda for Sustainable Development. For this purpose, the boundary shifts of Gölcük Lake in Simav, Kütahya, Türkiye, were examined using high-resolution Google Earth images from 2013 and 2023. Supervised classification techniques in ArcGIS Pro were applied to analyze changes in the lake's area over a decade marked by significant climate variability. The use of spatial data and geographic information system (GIS) methods allowed for precise measurement and visualization of these changes, proving highly useful for assessing the extent and impact of lake shrinkage. The findings reveal a 22.7% reduction in lake area, equating to approximately 32,279 m², indicating a notable shrinkage likely influenced by environmental factors. Temperature and precipitation data, obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate and the Turkish State Meteorological Service, were also assessed. The data showed an increase in average temperature from 11.5°C to 13°C and a slight decrease in precipitation over the period, suggesting potential contributions from climate change to the lake's shrinkage. These results underscore the importance of ongoing monitoring and sustainable management to mitigate the adverse impacts of climate change on freshwater resources.

Keywords *Boundary Shift, Climate Change, Gölcük Lake, Kütahya, Geographic Information System*

Öz

İklim değişikliği, bugün dünyanın karşı karşıya olduğu en acil sorunlardan biri olup, ekosistemler, insan sağlığı ve küresel ekonomiler üzerinde geniş kapsamlı etkiler yaratmaktadır. Bu durum, büyük ölçüde ormansızlaşma, sanayi kaynaklı emisyonlar ve fosil yakıtların yoğun kullanımı gibi insan faaliyetlerinin neden olduğu, sıcaklık, yağış düzenleri ve aşırı hava olaylarının sıklığında önemli değişimlerle tanımlanmaktadır. Birleşmiş Milletler, 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi kapsamında 2015 yılında kabul edilen 17 küresel hedeften oluşan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile kolektif bir yaklaşım sunmuştur. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye'nin Kütahya iline bağlı Simav ilçesindeki Gölcük Gölü'nün sınır değişimleri, 2013 ve 2023 yıllarına ait yüksek çözünürlüklü Google Earth görüntüleri kullanılarak incelenmiştir. Göl alanındaki değişimleri analiz etmek için ArcGIS Pro'da gözetimli sınıflandırma teknikleri uygulanmıştır. Mekansal veri ve coğrafi bilgi sistemleri (CSB) yöntemlerinin kullanımı, bu değişikliklerin yüksek hassasiyetle ölçümünü ve görselleştirilmesini sağlamış ve göl küçülmesinin boyutunu ve etkisini değerlendirmede son derece yararlı olmuştur. Elde edilen sonuçlar, göl alanında %22,7'lik bir azalma olduğunu ve yaklaşık 32.279 m²'lik önemli bir küçülmeyi göstermektedir; bu küçülmenin çevresel faktörlerden etkilenmiş olabileceği düşünülmektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen sıcaklık ve yağış verileri de değerlendirilmiştir. Veriler, ortalama sıcaklığın 2013'te 11,5°C'den 2023'te 13°C'ye yükseldiğini ve aynı dönemde yağış miktarında hafif bir azalma olduğunu göstermektedir; bu durum, iklim değişikliğinin gölün küçülmesine potansiyel bir katkısı olabileceğini düşündürmektedir. Bu sonuçlar, tatlı su kaynakları üzerindeki iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak için sürekli izleme ve sürdürülebilir yönetimin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler *Sınır Değişimi, İklim Değişikliği, Gölcük Gölü, Kütahya, Coğrafi Bilgi Sistemleri*

1. Introduction

Climate change represents one of the most significant challenges currently facing humanity in the 21st century. It is defined as a major alteration in the climate patterns of the Earth, characterized by changes in temperature, precipitation and other atmospheric conditions over an extended period of time (Pachauri et al. 2014). The primary drivers of climate are human activities, particularly the burning of fossil fuels, deforestation and industrial processes (Brosch, 2021; Perrier et al. 2005; Pollack et al. 1998). Such activities result in an increase in atmospheric greenhouse gases, thereby contributing to

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Enes ZENGİN e-posta/e-mail: eneszengin@itu.edu.tr

global warming and a multitude of adverse environmental impacts (Jeffry et al. 2021). The effects of climate change are far-reaching and complex, impacting ecosystems, human health, and economic stability in a multitude of ways (Yang et al. 2022).

The increase in global temperatures has resulted in a rise in the frequency and severity of weather events, including hurricanes, droughts and floods. These have caused disruption to communities and widespread destruction (Marsooli and Lin, 2020). Moreover, shifts in climate patterns present a significant challenge to biodiversity, as numerous species grapple with the difficulties of adapting to swiftly evolving habitats and modified nutritional resources. Additionally, the societal and economic consequences of climate change are far-reaching and pervasive (Dietz et al. 2024). Those in vulnerable populations, particularly in developing countries, face an elevated risk to their livelihoods, food security, and access to clean water. The potential for health concerns to be exacerbated, such as the spread of infectious diseases and heat-related illnesses, is also heightened by climate change (Taconet et al. 2020). As the global community addresses these challenges, the necessity for prompt and collective action to mitigate climate change and adapt to its unavoidable effects has never been more pressing. A comprehensive understanding of the complexities of this phenomenon is essential for the development of effective policies and strategies for a sustainable future. The shrinking of lakes represents a significant environmental issue that is reflective of broader changes in climate and land use, with profound implications for both ecosystems and human communities which are directly related with climate change (Kiage and Douglas, 2020). As the size of freshwater bodies decreases, the impact extends not only with the loss of water volume but also disturbing complex ecological balances and endangers biodiversity.

Lake shrinkage is also an important issue when considering the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs). The 17 SDGs aim to address global challenges and promote sustainable development, with specific goals related to water resources, climate action, and ecosystem conservation. For example, Goal 6 (clean water and sanitation) emphasizes the need to ensure the availability and sustainable management of water resources, which is directly affected by the shrinking of lakes. As lakes shrink, the quality and availability of freshwater for drinking, agriculture, and sanitation are compromised, threatening the health and livelihoods of surrounding communities. In addition, lake shrinkage is closely linked to Goal 13 (Climate Action) because it reflects the broader impacts of climate change, such as changes in precipitation patterns and increased evaporation rates. In addition, the ecological consequences of lake shrinkage, including biodiversity loss and habitat degradation, are linked to Goal 15 (Life on Land), which calls for the protection, restoration and sustainable use of terrestrial ecosystems.

Addressing lake shrinkage is critical not only to achieving these interrelated goals, but also to building resilience in communities that rely on these vital freshwater resources, ultimately contributing to a sustainable and equitable future. As computing technologies and software continue to advance, lake shrinkage studies have evolved significantly. Remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), and high-resolution satellite imagery have provided new ways to monitor and analyze lake levels and surfaces (Bastawesy et al. 2008; Kimijima et al. 2020). As a part of these new tools to use, support vector machine (SVM) and ISO cluster classification of Landsat images provided that the Al-Razzazah Lake in Iraq experienced an 84.1% decline in surface area and a 63.4% reduction in shoreline length between 1989 and 2019 (Jumaah et al. 2022). Another study focusing on Lake Burullus in Egypt using an ISODATA classification of Landsat images between 1985 and 2020 provided an insight about the %44.8 loss of lake surface (Keshta et al. 2022). A synthesis approach known as modeling lake water changes model (LWC-model) was proposed by another study using a temporal Landsat data showed a %58.2 water surface reduction for the Lake Urmia, Iran (Emami and Zarei, 2021). In the literature, there are many tools available for analyzing changes and shifts in lake boundaries, but Google Earth and related tools are very commonly preferred by various researchers (Amani et al. 2020; Li et al. 2022; Pang et al. 2024; Yan et al. 2021; Zhao et al. 2024). These technologies have improved the ability to accurately assess the shrinkage of lake boundaries and to track changes over time. Additionally, data analysis and modeling software allows for complex simulations and scenarios to understand how climate change and human activities affect lake ecosystems. As a result, conservation strategies and management plans can be developed with more comprehensive and detailed data on lake shrinkage. These advances help both scientists and policymakers achieve sustainable water management and ecosystem protection goals.

Considering climate change and its widespread impacts, this study focuses on lake shrinkage, specifically changes at Gölcük lake, Simav, Kütahya, Türkiye (Figure-1). The aim of this research is to assess the extent of shrinkage of the lake's boundary between the years 2013 and 2023, a period that has witnessed significant climatic variations.

High-resolution Google Earth images with 30-cm spatial pixel resolution from both years, which provide detailed visual data to facilitate accurate measurements, are used to conduct this analysis. The study employs supervised learning methods, a powerful approach to machine learning that uses labeled data sets to train algorithms to detect patterns and make predictions. The results of this study will contribute to the broader discourse on the impacts of climate change and inform sustainable management practices aimed at mitigating the adverse effects of lake shrinkage.

2. Materials and Methods

2.1 Study Area

Gölcük lake, which is located about 5 km north of Simav district center of Kütahya province, is classified as a tectonic lake (Ocakoğlu et al. 2022). It is situated to the south of the Simav Plain and is influenced by the surrounding topography, including Simav Mountain to the south, Gölcük to the northeast, Akdağ to the northwest and Şaphane Mountain to the east. The streams flowing from these mountains, along with the seasonal rainfalls, contribute to the water resources of the Simav River, which are supports the hydrology and water cycle of the Gölcük lake. The drying process of Gölcük Lake, which began in 1961, took approximately 20 years to complete, and by the 1980s, the dried lakebed was being used for agriculture purposes. Administrative issues regarding the lake area emerged in the 1970s. Initially, with the decision of the Council of Ministers dated 23.09.1977 and numbered 77/13966, published in the Official Gazette dated 27.10.1977 and numbered 16607, the Simav Land and Agricultural Reform Region was declared in accordance with Law No. 1757 on Land and Agricultural Reform which was later repealed. The most significant feature of the Gölcük Lake is that agriculture has been conducted without the use of irrigation or fertilizers. For this reason, the soil of the lakebed holds great importance for the local community. Beans are the most commonly cultivated crop on the leased lakebed. Between 1960 and 1990, the lakebed was the most productive agricultural land in the region. However, since 2005, a decline in productivity has been observed due to factors such as the contamination of the area with domestic and chemical waste, problems arising from leasing, and improper farming practices. While 750–800 kg of dry beans per decare were harvested between 1970 and 1980, this value has dropped below 100 kg per decare in recent years. With this decline in productivity, beans, which were the most commonly grown crop in the region, have been replaced by corn, sunflower, wheat, sugar beet, and poppy. Most of the beans grown on the lakebed are produced by farmers for their own use (Personal Communication). No depth measurements have been recorded to monitor changes in the water level of the lake over the years. Gölcük lake and its surrounding area also serve as a recreational site, making it an important cultural and tourist center in the region.

2.2 Data Collection

In order to assess the boundary shifts of Gölcük lake over an optimal date range, Google Earth images with a 30 cm pixel resolution from 28/04/2013 and 12/09/2023 were used. The high resolution of these images enables a comprehensive assessment of changes in the land cover features of the study area. The generalized flowchart of the study is shown in Figure 2 including all steps followed in this study.

2.3 Data Processing

Image processing, spatial analysis, and similar techniques are fundamental tools for earth scientists working with aerial, spatial, and georeferenced data. ArcGIS Pro, developed by ESRI, is the most professional tool on the market for this purpose. It is used by many researchers in earth science fields such as natural hazards, environmental geology, engineering geology, and even in rock mechanics for image processing, creating distribution maps, and assessing spatial data (Acar and Özkul, 2020; Acar and Zengİn, 2023; Öngen and Ergüler, 2020; Öngen and Zengin, 2025; Zengin, 2023a, 2023b; Zengin and Erguler, 2022). By default, Google Earth images are not georeferenced which prevents working with coordinated spatial dataset and satellite images. For this reason, the first step is to georeference images from both dates prior using them in ArcGIS Pro. To accomplish this, the georeferencing tool in ArcGIS Pro was used with four control points to increase the accuracy between the two images and the spatial outputs of the analysis. These control points were selected based on distinct and clearly identifiable features, such as road intersections and building corners, visible in both the satellite images and the reference maps. The accuracy of the georeferencing process was evaluated by calculating the Root Mean Square (RMS) error.

2.4 Supervised Classification

It is possible to perform both supervised and unsupervised classification with spatial analysist extension provided within the multivariate toolset. Image classification toolbar provides user-friendly hands-on environment for creating a training samples which will be used for classification of the input image along with signature files.

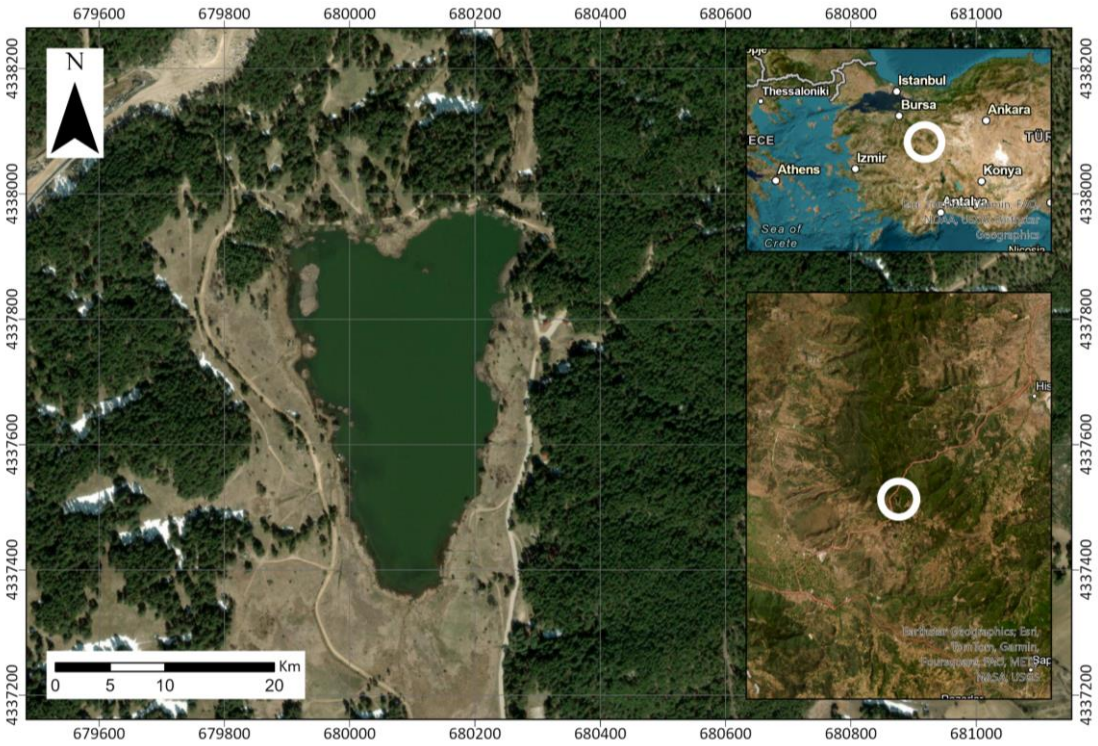


Figure 1. Aerial view of Gölcük lake and its surroundings.

In supervised classification, training samples are used to identify each class based on user-defined criteria. In this study, the National Land Cover Database 2011 (NLCD2011) was chosen to determine the land cover classes. Although NLCD2011 contains 9 classes, only 5 were used to match the land cover features in the study area:

- *Water:* Areas of open water with minimal or no vegetation.
- *Developed:* Areas primarily vegetated with some constructed materials.
- *Barren:* Regions with sparse vegetation, largely consisting of exposed rock, soil, or sand.
- Forest: Regions dominated by evergreen trees.
- *Herbaceous:* Areas covered predominantly by grass-like or herbaceous vegetation.

The image classification process involved the identification of distinct land cover classes based on their unique pixel characteristics and sample RGB values, which represent the most characteristic pixels for each class. The classes, listed in alphabetical order, are as follows: Barren (RGB: 189-193-194), Developed (RGB: 221-219-232), Evergreen (RGB: 20-32-46), Herbaceous (RGB: 119-105-104), and Water (RGB: 5-1-48). These RGB values were selected as representative samples to ensure accurate differentiation and effective classification of the land cover types within the study area.

After creating the training samples, a signature file can be generated to store the defined class zones along with their statistical information. At this stage or after classification, if necessary, the training samples can be redefined or corrected. Support Vector Machine (SVM) is a popular supervised classification algorithm used within the Image Classification toolbar to differentiate between classes in remote sensing data. SVM is effective for classifying high-dimensional data, making it suitable for complex datasets in land cover, vegetation, and urban studies (Noble, 2006; Pisner and Schnyer, 2020; Schölkopf, 1998). In ArcGIS Pro, SVM can classify multiband imagery or segmented raster inputs by creating a hyperplane that best separates data into predefined classes by the users. It is particularly advantageous for its ability to handle noisy data, correlated bands, and imbalanced training samples, requiring fewer samples than other methods like maximum likelihood classification. For segmented rasters, SVM calculates additional attributes such as converged color, mean digital number, standard deviation, compactness, and rectangularity to enhance classification accuracy. The results are output as an Esri classifier definition file (.ecd), which contains all statistical and classification details. SVM is highly suitable for applications like land cover mapping, water body extraction, and environmental monitoring, making it a preferred choice for researchers working with complex datasets in diverse geographic and environmental contexts. The effective use of SVM and its capabilities makes it ideal for working with mixed or overlapping land features, as in this study.

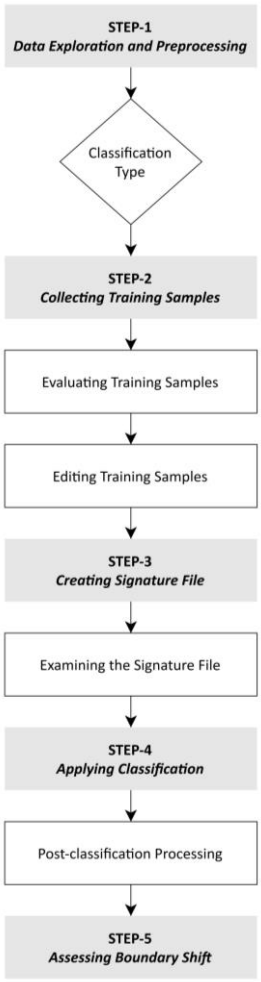


Figure 2. Flowchart illustrating the methodology used in the study, including followed steps.

2.5 Change Detection

Following classification, the lake boundaries from 2013 and 2023 were extracted and converted from raster to polygon in ArcGIS to calculate the area covered by each class. A change detection analysis was performed to quantify the shrinkage of the lake boundary by focusing only the *"water"* in the study area. The changes in area were then calculated to determine the extent of shrinkage, and a spatial overlay was conducted to visualize the differences between the two time periods.

2.6 Accuracy Analysis

The accuracy assessment of satellite-derived maps, including land use and land cover maps, from various sources such as Google Earth Pro, is a crucial step in remote sensing data processing to ensure the quality and reliability of the generated maps (Rwanga et al. 2017). As suggested by different studies, the accuracy assessment of satellite imagery involves three fundamental steps: determining the sample size and sampling method, collecting reference data, and using a confusion matrix to evaluate classification metrics (Chaaban et al. 2022). There are various sampling methods commonly used in the accuracy assessment of satellite maps, including simple random sampling, stratified random sampling (SRS), equalized stratified random sampling (ESR), stratified even sampling, cluster sampling, and systematic sampling (Dong et al. 2020). In this study, the stratified random sampling method was chosen. Stratified random sampling ensures that randomly distributed points are created within each class, with the number of points proportional to the relative area of the class. To enhance the reliability of the results, over 100 sampling points were generated, and ground truth values were subsequently added to the attribute table. Then, a confusion matrix was created to compare the reference and classified data. By implementing the confusion matrix for two separate classification results from 2013 and 2023, accuracy metrics such as user's accuracy, producer's accuracy, Kappa coefficient, and classification accuracy for each class were derived. Confusion matrix for the years 2013 and 2023 given in Table 1 and Table 2 respectively.

Table 1. Confusion matrix for the year 2013.

Class	Water	Barren	Forest	Herbaceous	Total	U_Accuracy	Kappa
Water	16	0	3	0	19	0.84	0
Barren	0	7	0	3	10	0.70	0
Forest	1	0	45	3	49	0.92	0
Herbaceous	0	0	3	25	28	0.89	0
Total	17	7	51	31	106	0	0
P_Accuracy	0.94	1	0.88	0.81	0	0.88	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0.82

Table 2. Confusion matrix for the year 2023.

Class	Water	Developed	Barren	Forest	Herbaceous	Total	U_Accuracy	Kappa
Water	14	0	0	1	0	15	0.93	0
Developed	0	7	0	2	1	10	0.70	0
Barren	0	0	6	0	5	11	0.55	0
Forest	0	0	0	47	2	49	0.96	0
Herbaceous	0	0	0	5	12	17	0.71	0
Total	14	7	6	55	20	102	0	0
P_Accuracy	1	1	1	0.85	0.6	0	0.84	0
Kappa	0	0	0					0.76

3. Results and Discussions

This study aimed to demonstrate the boundary shift of Gölcük Lake using high-resolution Google Earth images from 2013 and 2023 (Figure 3). A five-step flowchart was employed in this study, including *Data Exploration and Preprocessing*, *Collecting Training Samples*, *Creating Signature Files*, *Applying Classification*, and *Assessing Boundary Shifts*. The 30-cm spatial resolution of the Google Earth images used in this study has also increased detail and accuracy of the results. The analysis of Gölcük Lake's boundary changes over the past decade reveals a reduction in lake area. In 2013, the lake covered an area of 142,396 m², which decreased to 110,117 m² by 2023. This reduction represents a shrinkage of approximately 32,279 m², or 22.7%, over ten years (Figure 4). Such a considerable decrease highlights the impact and important of potential environmental and anthropogenic factors on the lake which needs to be investigated further. The use of high-resolution Google Earth images and supervised classification methods provided reliable insights into these changes, underscoring the importance of ongoing monitoring and conservation efforts for Gölcük Lake.

Table-1 presents the accuracy assessment results for the 2013 classification, highlighting the performance of four classes: Water, Barren, Forest, and Herbaceous. The overall classification accuracy is high, with user's accuracy ranging from 70% to 92% and producer's accuracy ranging from 81% to 100%. The Water class achieved a user's accuracy of 84% and a producer's accuracy of 94%, with three misclassifications into the Forest class. The Barren class exhibited the lowest user's accuracy at 70%, due to three samples being misclassified as Herbaceous, but it achieved a producer's accuracy of 100%, indicating that all Barren pixels were correctly identified. The Forest class showed a user's accuracy of 92% and a producer's accuracy of 88%, with most errors occurring in the Water and Herbaceous classes. The Herbaceous class had a user's accuracy of 89% and a producer's accuracy of 81%, with some misclassifications into the Forest and Barren classes. The overall Kappa coefficient of 0.82 indicates a high level of agreement and reliability in the classification. Table-2 provides the accuracy assessment results for the 2023 classification, which includes five classes: Water, Developed, Barren, Forest, and Herbaceous. The overall classification accuracy is high, with user's accuracy ranging from 55% to 96% and producer's accuracy ranging from 60% to 100%. The Water class demonstrated strong performance with a user's accuracy of 93% and a producer's accuracy of 100%, with only one misclassification into the Forest class. The Developed class achieved a user's accuracy of 70% and a producer's accuracy of 100%, though two samples were misclassified as Forest and one as Herbaceous.

The Barren class showed the lowest user's accuracy at 55%, due to misclassifications into the Herbaceous class, despite a producer's accuracy of 100%. The Forest class performed exceptionally well, with a user's accuracy of 96% and a producer's accuracy of 85%, with minor misclassifications into the Herbaceous class. The Herbaceous class had a user's accuracy of 71% and a producer's accuracy of 60%, with some confusion observed in the Barren and Forest classes. The overall Kappa coefficient of 0.76 indicates substantial agreement and reliable classification results. However, noticeable errors between overlapping classes, such as Barren and Herbaceous, and Developed and Forest, could be addressed by incorporating additional spectral bands or auxiliary data like DEMs having a higher spatial resolution similar to used in this study. Overall, the 2023 classification demonstrates robust performance, with room for improvement through enhanced training data and additional contextual information. The temperature data between 1931 to 2023 and precipitation data from 2005 to 2023 were also considered in analyzing the boundary changes of Gölcük Lake (Figure 5).

As can be seen from Figure 3, there is a meteorological station within the proximity of the study area (39°09'57.0"N 29°04'56.0"E). The data prior to the installation of this station near the lake were obtained from the station located in Simav city center (39°07'30.7"N 28°59'30.7"E). Although the time span is relatively short, the average temperature increased from 11.5°C in 2013 to 13°C in 2023 over this decade. During the same period, while there were seasonal fluctuations in precipitation amounts, the overall trend showed a slight decrease. These data, which can be seen as indicators of climate change, may also have contributed to the lake's shrinkage. The temperature and precipitation data were obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate and the Turkish State Meteorological Service. Figure 5. illustrates the long-term trends in average temperature (°C) and average precipitation (mm) in the study area. The temperature data, spanning from 1931 to 2023, shows relatively stable values with minor fluctuations until the 1990s, followed by a slight upward trend, suggesting a gradual warming over the decades. The precipitation data, available from 2005 to 2023, displays significant variability, ranging from approximately 400 mm to 700 mm, with a general increasing trend over the period.

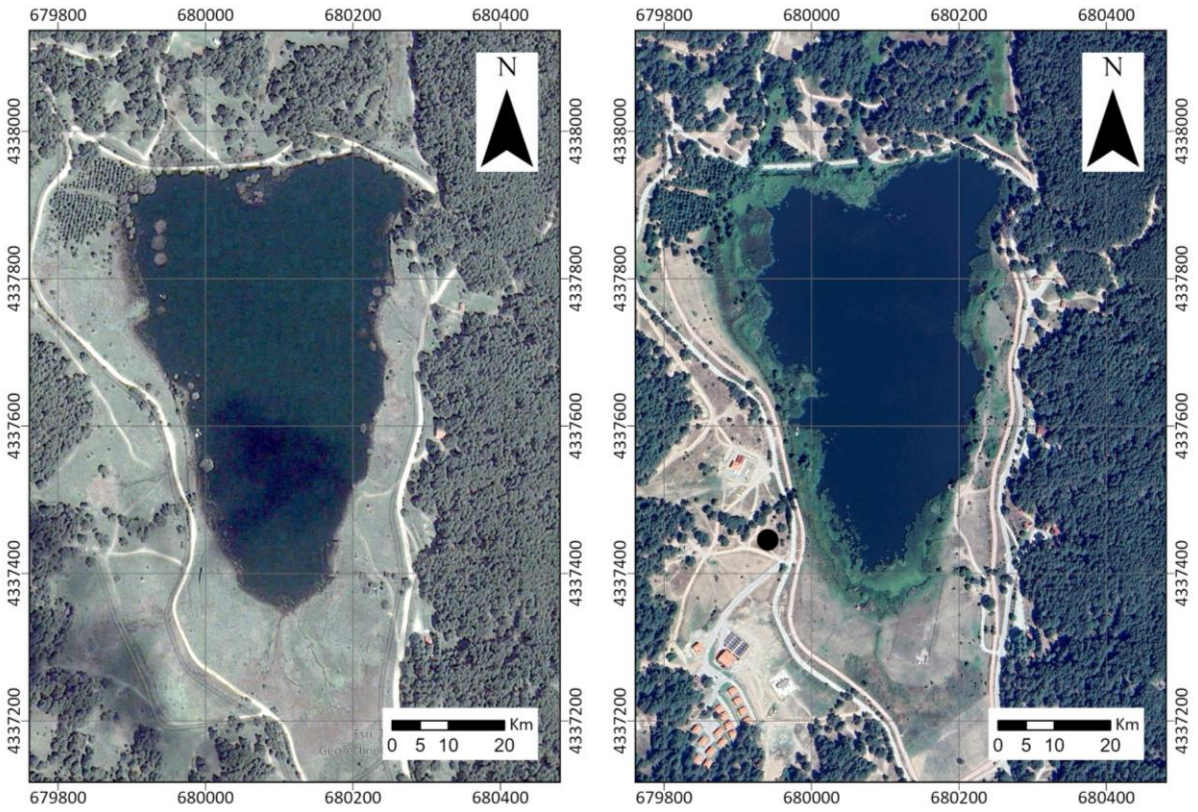


Figure 3. Google Earth images of the Gölcük Lake (Left: 2013 and Right: 2023, Black dot: Meteorological station).

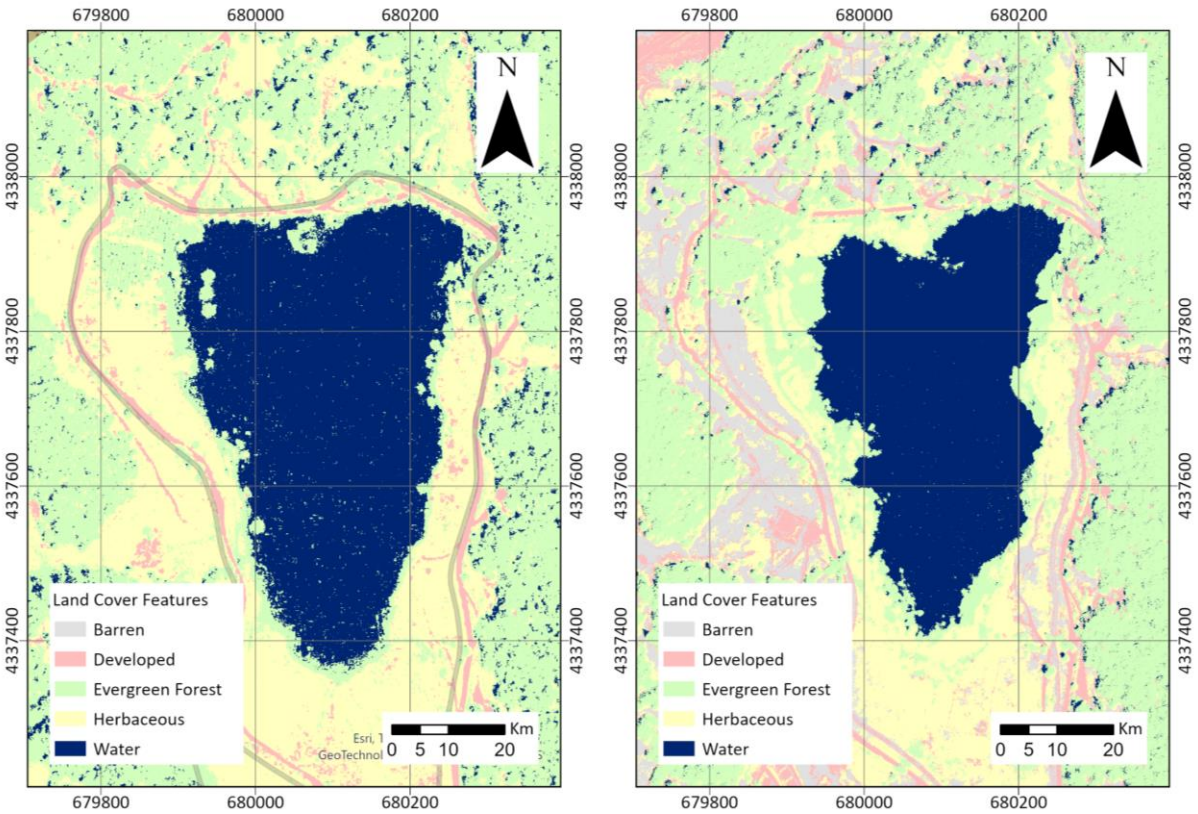


Figure 4. Boundary shifts at Gölcük Lake observed through supervised classification analysis (Left: 2013 and Right: 2023).

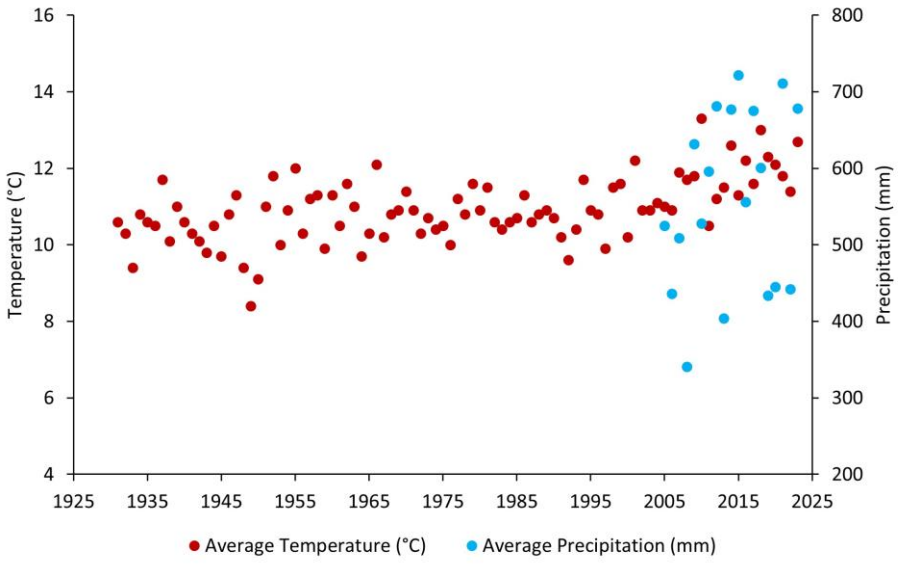


Figure 5. Annual average temperature and precipitation trends for the Gölcük Lake region from 2013 to 2023.

These trends indicate a potential correlation between rising temperatures and increased precipitation in recent years, reflecting possible impacts of climatic changes in the region. Further statistical analysis is required to confirm these observations and assess their implications considering regional rainfall, water resource status and basin regions.

4. Conclusions

In conclusion, this study successfully assessed the boundary shifts of Gölcük Lake over the period from 2013 to 2023 using high-resolution Google Earth images and advanced supervised classification techniques in ArcGIS Pro. The results indicate a significant reduction in lake area, amounting to approximately 32,279 m² or 22.7% shrinkage, highlighting the impact of potential environmental changes. In studies where a similar approach to the one used in this study was applied, high coefficients were achieved, particularly in identifying lake surfaces (Yang et al. 2012). Google Earth images are also utilized for semi-automatic mapping of temporal changes in lake boundaries with high resolution. The successful results achieved, particularly in glacial lakes, make this approach a widely preferred option in areas lacking high-resolution sources such as Landsat and Sentinel (Beck et al. 2013). Drone images in RGB format with similar resolution to Google Earth images have also been used in boundary delineation and analysis studies related to lakes (Buchsteiner et al. 2023). In this study, the usability of RGB-format Google Earth images as an alternative to multispectral satellite images for detecting changes in lake boundaries studied. The images were found to be particularly successful in distinguishing the boundaries of wetlands; however, due to the RGB format of the data source, some limitations were observed in separating barren, developed, and herbaceous areas. Additionally, the analysis considered temperature and precipitation trends, with findings suggesting that rising temperatures and decreasing precipitation may have contributed to this shrinkage, potentially influenced by climate change. This study emphasizes the importance of continued monitoring and conservation efforts for Gölcük lake, serving as a case study for understanding the broader implications of climate change on freshwater resources. By integrating remote sensing and GIS tools, this research provides a reliable methodology for lake boundary monitoring, supporting the development of sustainable management practices in response to ongoing environmental changes.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they have complied with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, Methodology, Data curation, Software, Validation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization.

Author-2: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing – Original Draft.

Author-3: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing – Original Draft.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statement

Data will be made available upon reasonable request.

Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to the reviewers for their constructive comments and valuable suggestions, which have significantly contributed to

improving the quality of this manuscript. Additionally, the authors thank Kütahya Dumlupınar University for providing licensed access to the ArcGIS Pro software through the BAP project, funded by the Kütahya Dumlupınar University Scientific Research Projects Coordination Office under grant number #2024-01.

5. References

Acar, R.U. and Özkul, C., 2020. Investigation of heavy metal pollution in roadside soils and road dusts along the Kütahya–Eskişehir Highway. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, 216. https://doi.org/10.1007/s12517-020-5206-2

Acar, R.U. and Zengİn, E., 2023. Performance Assessment of Landsat 8 and Sentinel-2 Satellite Images for the Production of Time Series Land Use/Land Cover (LULC) Maps. *Journal of Scientific Reports-A*, **53** 1–15. https://doi.org/10.59313/jsr-a.1213548

Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S.A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S.M., Moghaddam, S.H.A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q. and Brisco, B., 2020. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **13**, 5326–5350. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052

Bastawesy, M.A., Khalaf, F.I. and Arafat, S.M., 2008. The use of remote sensing and GIS for the estimation of water loss from Tushka lakes, southwestern desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, **52**, 73–80. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.03.006

Beck, M.W., Vondracek, B., Hatch, L.K. and Vinje, J., 2013. Semi-automated analysis of high-resolution aerial images to quantify docks in glacial lakes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* **81**,60–69. https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2013.04.006

Brosch, T., 2021. Affect and emotions as drivers of climate change perception and action: a review. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, **42**, 15–21. https://doi.org/10.1016/J.COBEHA.2021.02.001

Buchsteiner, C., Baur, P.A. and Glatzel, S., 2023. Spatial Analysis of Intra-Annual Reed Ecosystem Dynamics at Lake Neusiedl Using RGB Drone Imagery and Deep Learning. *Remote Sensing*, **15**, Page 3961 15, 3961. https://doi.org/10.3390/RS15163961

Chaaban, F., El Khattabi, J. and Darwishe, H., 2022. Accuracy Assessment of ESA WorldCover 2020 and ESRI 2020 Land Cover Maps for a Region in Syria. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, **6**, 1–23. https://doi.org/10.1007/s41651-022-00126-w

Dietz, T., Shwom, R.L., Whitley, C.T., 2024. Climate Change and Society. *Annual Review of Sociology*, **46**, 15. https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919

Dong, S., Chen, Z., Gao, B., Guo, H., Sun, D. and Pan, Y., 2020. Stratified even sampling method for accuracy assessment of land use/land cover classification: a case study of Beijing, China. *International Journal of Remote Sensing*, **41**, 6427–6443. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1739349

Emami, H. and, Zarei, A., 2021. Modelling lake water's surface changes using environmental and remote sensing data: A case study of lake Urmia. Remote Sensing Applications, **23**, 100594. https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100594

Jeffry, L., Ong, M.Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M. and Show, P.L., 2021. Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel,* **301**. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121017

Jumaah, H.J., Ameen, M.H., Mohamed, G.H. and Ajaj, Q.M., 2022. Monitoring and evaluation Al-Razzaza lake changes in Iraq using GIS and remote sensing technology. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **25**, 313–321. https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2022.01.013

Keshta, A.E., Riter, J.C.A., Shaltout, K.H., Baldwin, A.H., Kearney, M., El-Din, A.S. and Eid, E.M., 2022. Loss of Coastal Wetlands in Lake Burullus, Egypt: A GIS and Remote-Sensing Study. *Sustainability (Switzerland)* **14**,4980. https://doi.org/10.3390/SU14094980/S1

Kiage, L.M. and Douglas, P., 2020. Linkages between land cover change, lake shrinkage, and sublacustrine influence determined from remote sensing of select Rift Valley Lakes in Kenya. *Science of the Total Environment*, **709**. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136022

Kimijima, S., Sakakibara, M., Amin, A.K.M.A., Nagai, M. And Arifin, Y.I., 2020. Mechanism of the rapid shrinkage of limboto lake in Gorontalo, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, **12**, 1–14. https://doi.org/10.3390/su12229598

Li, K., Wang, J., Cheng, W., Wang, Y., Zhou, Y., Altansukh, O., 2022. Deep learning empowers the Google Earth Engine for automated water extraction in the Lake Baikal Basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,**112**, 102928. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2022.102928

Marsooli, R. and Lin, N., 2020. Impacts of climate change on hurricane flood hazards in Jamaica Bay, New York. *Climate Change*, **163**, 2153–2171. https://doi.org/10.1007/s10584-020-02932-x

Noble, W.S., 2006. What is a support vector machine? *Nature Biotechnology*, **24**, 1565–1567. https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565

Ocakoğlu, F., Kuzucuoğlu, C., Akbulut, A. and, Çilingiroğlu, Ç., 2022. Lake level changes and paleo-precipitation estimations based on colluvial stratigraphy of Holocene sediments in West Anatolia (Simav Graben). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **597**. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111001

Öngen, A.S. and Ergüler, Z.A., 2020. The effect of urban heat island on groundwater located in shallow aquifers of Kutahya city center and shallow geothermal energy potential of the region. *Bulletin Of The Mineral Research and Exploration,* **165**, 1–24. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.820395

Öngen, A.S. and Zengin, E., 2025. Spatial assessment of urban heat island (UHI) in Kütahya using Landsat-8 satellite data. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **14**, 122–131. https://doi.org/10.28948/NGUMUH.1527341

Pachauri, R.K., Meyer, L., Hallegatte France, S., Bank, W., Hegerl, G., Brinkman, S., van Kesteren, L., Leprince-Ringuet, N. and van Boxmeer, F., 2014. *Climate Change 2014 Synthesis Report*, Kristin Seyboth (USA). Gian-Kasper Plattner.

Pang, Y., Yu, J., Xi, L., Ge, D., Zhou, P., Hou, C., He, P. and Zhao, L., 2024. Remote Sensing Extraction of Lakes on the Tibetan Plateau Based on the Google Earth Engine and Deep Learning. *Remote Sensing*, **16**, 583. https://doi.org/10.3390/RS16030583

Perrier, F., Le Mouël, J.-L., Poirier, J.-P. and Shnirman, M.G., 2005. Long-term climate change and surface versus underground temperature measurements in Paris. *International Journal of Climatology*, **25**, 1619–1631. https://doi.org/10.1002/joc.1211

Pisner, D.A. and Schnyer, D.M., 2020. Support vector machine. Machine Learning: Methods and Applications to Brain Disorders, **2020**, 101–121. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00006-7

Pollack, H.N., Huang, S., Shen, P.-Y., 1998. Climate Change Record in Subsurface Temperatures: A Global Perspective. *Science*, **282**, 279–281. https://doi.org/10.1126/science.282.5387.279

Rwanga, S.S., Ndambuki, J.M., Rwanga, S.S., Ndambuki, J.M., 2017. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, **8**, 611–622. https://doi.org/10.4236/IJG.2017.84033

Schölkopf, B., 1998. SVMs - A practical consequence of learning theory. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, **13**, 18–21. https://doi.org/10.1109/5254.708428

Taconet, N., Méjean, A., Guivarch, C., 2020. Influence of climate change impacts and mitigation costs on inequality between countries. *Climatic Change*, **160**, 15–34. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02637-w

Yan, Y., Zhuang, Q., Zan, C., Ren, J., Yang, L., Wen, Y., Zeng, S., Zhang, Q., Kong, L., 2021. Using the Google Earth Engine to rapidly monitor impacts of geohazards on ecological quality in highly susceptible areas. *Ecological Indicators* ,**132**, 108258. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.108258

Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A.I., Fawzy, S., Rooney, D.W., Yap, P.S., 2022. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, **21**, 55–80. https://doi.org/10.1007/S10311-022-01499-6

Yang, X., Jiang, G.M., Luo, X., Zheng, Z., 2012. Preliminary mapping of high-resolution rural population distribution based on imagery from Google Earth: A case study in the Lake Tai basin, eastern China. *Applied Geography*, **32**, 221–227. https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2011.05.008

Zengin, E., 2023a. Inundation risk assessment of Eastern Mediterranean Coastal archaeological and historical sites of Türkiye and Greece. *Environmental Monitoring Assessment*, **195**. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11549-3

Zengin, E., 2023b. A Combined Assessment of Sea Level Rise (SLR) Effect on Antalya Gulf (Türkiye) and Future Predictions on Land Loss. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **51**, 1121-1133. https://doi.org/10.1007/s12524-023-01694-0

Zengin, E., Erguler, Z.A., 2022. Experimental investigation of pore-fracture relationship on failure behaviour of porous rock materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* **81**, 351. https://doi.org/10.1007/s10064-022-02857-y

Zhao, Z., Islam, F., Waseem, L.A., Tariq, A., Nawaz, M., Islam, I.U., Bibi, T., Rehman, N.U., Ahmad, W., Aslam, R.W., Raza, D., Hatamleh, W.A., 2024. Comparison of Three Machine Learning Algorithms Using Google Earth Engine for Land Use Land Cover Classification. *Rangeland Ecology & Management*, **92**, 129–137. https://doi.org/10.1016/J.RAMA.2023.10.007

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1574539
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 047201 (956-968)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 047201 (956-968)

Epileptik Nöbetlerin Tespiti için Öznitelik Çıkartma ve Sınıflandırma Yöntemleri

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 27.10.2024
Kabul/Accepted: 01.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Feature Extraction and Classification Methods for Epileptic Seizure Detection

Nuri İKİZLER*, Güneş EKİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Trabzon, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, Bonn Üniversitesi Epileptoloji Bölümü'nden alınan EEG veri seti kullanılarak, epileptik nöbet tespitine yönelik bir model sunulmuştur. Frekans analizinde daha hassas sonuçlar elde etmek için ikiye ayrılan sinyaller ile sınıflandırma algoritmalarının performansının artırılmasına katkı sağlanan çalışmada, her sınıf için oluşturulan referans sinyaller, sınıf içi tutarlılık ve anormal sinyallerin tespiti açısından önemli bir rol oynamıştır. Sinyallerin spektral özelliklerinin karşılaştırılmasının, sınıflar arasındaki farkların belirginleşmesine ve sınıflandırma performansının artmasına yardımcı olduğu modelde, öznitelik vektöründe spektral farklar, enerji, entropi ve frekans sapmaları gibi özellikler kullanılarak, özellikle Kullback-Leibler sapması ve Euclidean mesafesi gibi metrikler sayesinde sınıflar arası spektral farklılıkların tespit edilmesi sağlanmıştır. Sınıflandırma aşamasında kullanılan beş farklı sınıflandırma algoritması içinde k-EYK (k=1) ve LMA en yüksek performansı göstererek, on üç sınıflandırma görevi içerisinde yedi görevde epileptik nöbetlerin %100 doğrulukla tespit edilmesi sağlamıştır. Tüm sınıflandırma görevlerinde k-EYK ile LMA sınıflandırıcıları için bulunan ortalama %98,03 ve %98,23 doğruluk değerleri, modelin epileptik nöbet tespiti için çok başarılı ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Epileptik nöbet tespiti; EEG; Spektral analiz; Welch yöntemi; k-En yakın komşu; Lojistik model ağacı.*

Abstract

In this study, a model for detecting epileptic seizures is presented using the EEG dataset from the Epileptology Department of the University of Bonn. To obtain more precise results in frequency analysis, the signals are split into two parts, which contributed to improving the performance of the classification algorithms. The reference signals is obtained for each class played a significant role in assessing intra-class consistency and detecting abnormal signals. The comparison of spectral features among signals is helped to highlight differences between classes and enhance classification performance. In the feature vector, spectral differences, energy, entropy, and frequency deviations are employed, with metrics such as Kullback-Leibler divergence and Euclidean distance are used to detect spectral differences between classes. Among the five different classification algorithms used, k-NN (k=1) and LMT showed the highest performance, successfully detecting epileptic seizures with 100% accuracy in seven out of thirteen classification tasks. The average accuracy values of 98.03% for k-NN and 98.23% for LMT across all classification tasks demonstrate that the model is a highly effective and reliable method for detecting epileptic seizures.

Keywords: *Epileptic seizure detection; EEG; Spectral analysis; Welch method; k-Nearest neighbor; Logistic model tree*

1. Giriş

Günümüzde nörolojik hastalıkların en önemlilerinden biri olarak kabul edilen epilepsi beyinde bulunan nöronların anormal aktivitesinden kaynaklanmalıdır. Beyindeki bu elektriksel aktivite hastalarda bilinç kaybı, istemsiz hareketler, duyusal veya bilişsel bozukluklarla nöbetler şeklinde kendini gösterebilir. Hastadan hastaya farklılık gösteren nöbetlerle yaşamak zorunda olan dünya çapında 70 milyondan fazla insan vardır (İnt.Kay.-1). Her yıl yükselen bu rakam, özellikle az gelişmiş ülkelerde daha yüksek bir oranda artış göstermektedir (İnt.Kay.-2, Alotaiby 2016).

Epileptik nöbetler, fokal ve jeneralize olmak üzere ikiye ayrılır. Fokal nöbetler beynin belirli bölgesinde, tek taraflı bir etkiye sahipken, jeneralize nöbetler beynin bütününü etkiler ve fokal nöbetlerde görülen basit duyusal ve bilişsel semptomlara ek olarak ani kasılmalar ve düşme gibi daha geniş çaplı semptomlarla kendini gösterir. Beyinde oluşan bu anormal elektriksel aktivitenin ölçümünde ve epilepsi teşhisinin konulmasında, non-invaziv bir teknik olan Elektroensefalografi (EEG)'den faydalanılır (Milligan 2021). Beyin aktivitesinin zamana göre değişimi gösteren EEG epileptik hastalarda, pre-iktal, post-iktal, iktal ve inter-iktal adı verilen nöbet öncesi, nöbet sonrası, nöbet ve nöbet arası aralıklarının tespit edilmesinde önemli rol oynar.

EEG kullanılarak epileptik nöbetlerin tespit edilmesi uzun bir süreçtir. Hastadan alınan uzun EEG kayıtları tek tek incelenerek EEG işaretleri üzerinde pre-iktal, post-iktal, iktal ve inter-iktal bölümler tespit edilir. Uzman doktorlar

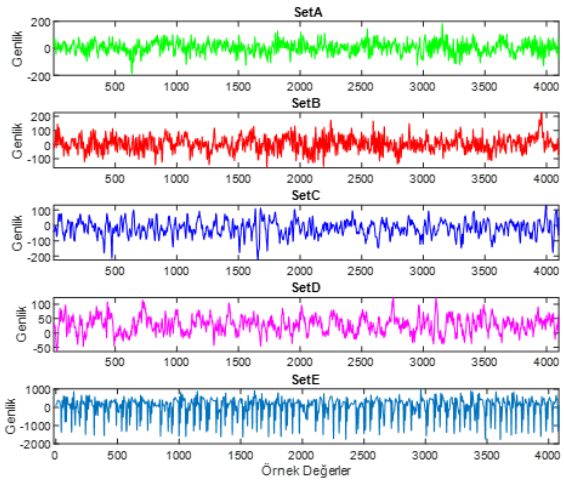
*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Nuri İKİZLER e-posta/e-mail: nikizler@ktu.edu.tr

tarafından yapılan bu incelemeler oldukça zahmetli ve zaman alıcıdır. Özellikle hastanın uykusunda alınan EEG kayıtları saatler sürmektedir. Bunların incelenmesinde büyük bir dikkat harcanarak epileptik nöbet bölümlerinin gözden kaçırılmaması gerekir. Bu bilgiler hastanın tedavisinde oldukça önemlidir. Ancak bir işlemin defalarca ve çok uzun sürelerde yapılması, insan doğası gereği sıkılmayı buna bağlı olarak dikkatin azalmasını ve bunun sonucunda da hatayı beraberinde getirir. Bilgisayarların ise kendilerine verilen görev ve emirleri bıkmadan, sıkılmadan defalarca hatasız yerine getirip, hayatımızın birçok alanında bize yardımcı olmaktadırlar. Önemli olan nokta doğru programlanmalarıdır. Bu nedenlerle epileptik nöbet tanıma üzerinde oldukça fazla araştırma yapılan önemli bir konudur. Araştırmacılar, farklı yöntemleri derleyerek, EEG kayıtları üzerinde en yüksek doğruluk değeri ile epileptik nöbetlerin tespiti konusunda çalışmaktadırlar. Bu alanda yapılan araştırmalar için en büyük zorluk, EEG nöbetlerini tespit edebilmek için EEG sinyallerine duyulan ihtiyaçtır. Bunun yanında tüm çalışmalarda bulunan doğruluk değerlerinin referans olarak alınacak EEG sinyallerine göre yapılması da araştırmaların başarasının değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Günümüzde epileptik nöbetlere ait daha fazla sayıda EEG sinyallerinin yer aldığı ve araştırmacılar tarafından ilgi odağı olmuş iki önemli EEG veri tabanı mevcuttur. CHB-MIT ve Bonn Üniversitesi EEG veri tabanları kullanılarak yapılan çalışmalar literatürde önemli yer tutmaktadır. Literatürde yapılan 190 deneysel çalışmanın 89 tanesi Bonn üniversitesi, 20 tanesi CHB-MIT veri tabanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Miltiadous vd. 2022). Çizelge 1'de bu iki veri tabanı kullanılarak yapılan çalışmaların bir kısmı yer almaktadır. Bu çalışmalar farklı zaman veya frekans bölgesi öznitelik çıkarım yöntemleri ve sınıflandırma yöntemleri içermektedir. Çeşitli sınıflandırma görevlerinde elde edilen doğruluk yüzdeleri bu çizelgede görülmektedir. Burada araştırmaların amacı hiç kuşkusuz en yüksek doğruluk yüzdesini elde etmektir. Ancak gerçekleştirilen işlemin bir sınıflandırma işlemi olduğu unutulmamalıdır. EEG veri tabanında yer alan farklı gruplardaki EEG verilerinin birbirinden ayrılmasından ziyade, araştırmacılar çalışmalarında pre-iktal, post-iktal, iktal ve inter-iktal bölümlerine ait sinyallerin normal EEG işaretlerinden ayrılmasına odaklı sınıflandırma görevleri üzerine Çizelge 1'de görüldüğü gibi yoğunlaşmışlardır. Çalışmamızda literatürde yer alan çalışmalardan öznitelik çıkarımı aşamasında farklı bir yaklaşım göstererek hazırladığımız modelin açık erişimli Bonn Üniversitesi EEG verilerini kullanarak otomatik nöbet tespitindeki doğruluk yüzdesinin bulunması hedeflenmiştir. Burada, Welch yöntemi ile elde edilen sinyallere ait güç spektral yoğunluğu (GSY) kullanılarak, veri setinde yer alan sinyallerin, referans güç spektral yoğunluklarına göre Kullback-Leibler sapması, Euclidean mesafesi, Jensen-Shannon sapması, Bhattacharya mesafesi, spektral enerji farkı, spektral entropi farkı, spektral düzlük farkı, spektral bant genişliği farkı, maksimum spektral sapma ve sıfır geçiş değerleri öznitelik vektörü çıkarımında kullanılmıştır. Elde edilen öznitelik vektörü kullanılarak Lojistik Model Ağacı sınıflandırma yöntemi ile farklı sınıflandırma görevleri için sınıflandırma doğruluk yüzdesi bulunmuş ve önerilen modelin otomatik nöbet tespitindeki başarısı araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Veri tabanı

Bu çalışmada Bonn Üniversitesi Epileptoloji Bölümü'nden alınan EEG veri seti kullanılmıştır. Kamuya açık olan bu veri seti, 173,61 Hz örnekleme frekansında 128 kanallı, 12 bitlik bir EEG kayıt sistemi ile örneklenerek kaydedilmiş ve bu 128 kanal, sinyallerin ortalama değeri alınarak tek bir kanala indirgenmiştir. Her set, 23,6 saniye boyunca 100 adet tek kanallı EEG segmenti içerir ve her segment 4097 ayrı örnek (A, B, C, D ve E) içerir. EEG sinyalleri 0,53- 40 Hz bandında filtrelenmiş ve tüm deneyler göz ve kas hareketlerinden kaynaklanan eserlerden temizlenmiştir. Kayıt, uluslararası 10-20 kanal sistemine göre yapılmıştır. Set A, gözleri açık ve kafatasının dışından kaydedilen 5 sağlıklı gönüllüden alınan EEG kayıtlarından oluşmaktadır. Set B, uyanık ve sakin bir durumda gözleri kapalı 5 gönüllü sağlıklı bireyden alınan yüzey EEG kaydıdır. C ve D setleri kafatasının içinden alınan kayıtlardır, beş epileptik hastada epileptik nöbet geçirmeyen bireylerde ölçülmüştür. E seti ise, aynı 5 hastadan nöbet döneminde kafatası boşluğunun içinden yapılan kayıtlardır (Miltiadous vd. 2022, Paul 2018). Veri setlerine ait genlik-zaman grafikleri Şekil 1'de ve istatistiksel özellikler ise Çizelge 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bonn Üniversitesi Epileptoloji Bölümü EEG veri tabanı içerisinde yer alan setlerin birleştirilmiş genlik-zaman gösterimleri

Çizelge 1. Farklı veri tabanları kullanarak, frekans/zaman bölgesi öznitelik çıkarımları ile otomatik epileptik nöbet tespitinde son yıllarda yapılan çalışmalar ve doğruluk oranları (Paul 2018).

Yazar ve Veri tabanı	Öznitelik Çıkarımı	Sınıflandırma	Sınıflandırma Görevi	Doğruluk (%)
Li vd. 2019 Bonn Üni. Veri tabanı	KZFD-Spektogram-Skalogram	DVM	AB-CD-E	99,6
Zhao vd. 2019 Bonn Üni. Veri tabanı	Entropi özellikleri	YSA	AB-CD-E	93,3
Choubey ve Pandey 2019 Bonn Üni. Veri tabanı	FFT	k-EYK	AD-E	97
Saini ve Dutta 2018 Bonn Üni. Veri tabanı	İstatistiksel ve Entropi özellikleri	YSA	A-D-S	99,3
Sharmila ve Mahalakshmi 2017 Bonn Üni. Veri tabanı	ADD	k-EYK	A-E	100
Eltrass vd. 2021 Bonn Üni. Veri tabanı	Sinyal enerjisi	Nicemlenmiş Çekirdek En Küçük Ortalama Kare	A-B-C-D-E	97,88
Jana vd. 2023 Bonn Üni. Veri tabanı	Frekans ve zaman bölgesi özellikleri	DVM	ABCD-E	97,63
Mandhouj vd. 2021 Bonn Üni. Veri tabanı	KZFD-Spektogram	Geleneksel Sinir Ağları (GSA)	AB-E	98,88
Wang vd. 2020 Bonn Üni. Veri tabanı	FFT	Ağırlıklandırılmış k-EYK	A-D-E	99
Al-Hadeethi vd. 2020 Bonn Üni. Veri tabanı	İstatistiksel özellikler	Adaboost LS-DVM	Tüm kombinasyonlar	99
Harpale ve Bairagi 2021 CHB-MIT Veri tabanı	Zaman bölgesi özellikleri-FFT	Bulanık Mantık Sınıflandırıcısı	İktal-interiktal	96,02
Zhang vd. 2020 CHB-MIT Veri tabanı	Ayrık FD- Bant enerjileri	AttVGGNet	İktal-interiktal	95,6
Gabr vd. 2020 CHB-MIT Veri tabanı	KZFD-Spektogram-Skalogram	GSA	İktal-preiktal-interiktal	97

Çizelge 2. Bonn Üniversitesi Epileptoloji Bölümü EEG veri tabanı içerisinde yer alan setlerine ait istatistiksel özellikler.

	Set A	Set B	Set C	Set D	Set E
Ortalama	-6,260	-12,513	-8,879	-6,200	-4,739
Medyan	-6	-12	-7	-6	-5
Std.Sapma	48,338	70,682	59,386	90,345	341,123
Min	-288	-424	-412	-1147	-1885
Max	294	360	623	2047	2047
Çarpıklık	0,035	-0,035	-0,045	3,970	-0,385
Basıklık	3,285	3,580	4,821	79,674	5,889

2.2 Welch yöntemi

Welch yöntemi, bir sinyalin güç spektral yoğunluğunu (GSY) hesaplamak için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, temel periodogram yöntemine göre daha güvenilir sonuçlar sağlar. Çünkü sinyali küçük parçalara ayırıp bu parçalardaki sonuçları ortalayarak spektral tahmindeki rastgele dalgalanmaları azaltır. Aşağıdaki adımlar izlenir (Alkan ve Kiymik 2006).

1- Sinyalin Parçalara Bölünmesi: Uzun sinyal x(n) belirli uzunluklarda, birbirleriyle örtüşen segmentlere ayrılır. Örneğin, %50 örtüşme ile N-uzunlukta segmentler elde edilir. Her segment, $x_i(n)$ ile gösterilir.

2- Pencereleme: Her segmente bir pencereleme fonksiyonu w(n) uygulanır. Genellikle Hamming ya da Hanning penceresi tercih edilir. Pencereli segment:

$$x_\omega(n) = x_i(n) \cdot \omega(n) \quad (1)$$

olarak hesaplanır.

3- Fourier Dönüşümü: Pencere uygulanmış her bir segment için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak frekans domenine geçilir. Her segmentin Fourier dönüşümü şu şekilde hesaplanır:

$$X_\omega(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_\omega(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

Burada k, frekans bileşenini temsil eder.

4- Periodogram Hesaplama: Her segment için periodogram, güç spektral yoğunluğu $P_x(k)$, Fourier dönüşümünün karesinin büyüklüğü olarak hesaplanır:

$$P_x(k) = \left(1/N|\omega|^2\right) |X_\omega(k)|^2 \quad (3)$$

Burada $|\omega|^2$, pencereleme fonksiyonunun enerji düzeltme faktörüdür.

5- Ortalama Alma: Tüm segmentlerin periodogramları ortalanarak nihai güç spektral yoğunluğu elde edilir:

$$P_{Welch}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} P_{x_i}(k) \quad (4)$$

Burada M, segment sayısını temsil eder.

Welch yöntemi, bu adımları izleyerek her segmentin periodogramını hesaplar ve bu periodogramları ortalayarak daha az gürültülü bir GSY tahmini üretir. Yöntemin avantajı, segmentleme ve ortalama alma yoluyla varyansı düşürmesi ve daha güvenilir bir spektral tahmin sağlamasıdır.

2.3 Öznitelik vektörü çıkarımı

2.3.1 Kullback-Leibler sapması (KLS)

Özellikle bilgi teorisi ve istatistikte kullanılan iki olasılık dağılımı arasındaki farklılığı ölçen bir yöntemdir. Asimetrik bir ölçümdür. KLS, iki olasılık dağılımı arasındaki bilgi kaybını veya bir dağılımın, diğer dağılıma göre ne kadar farklı olduğunu gösterir. Bir nevi, iki dağılımın ne kadar benzer ya da farklı olduğunu anlamaya çalışır (Ji vd. 2020).

Matematiksel olarak, Kullback-Leibler sapması şu şekilde ifade edilir:

$$D_{\{KL\}}(P||Q) = \sum_i P(i) \log\left(\frac{P(i)}{Q(i)}\right) \quad (5)$$

Bu formülde, P(i) ve Q(i), iki olasılık dağılımı olan P ve Q'nun ilgili olasılıklarıdır. $D_{\{KL\}}(P||Q)$, Q'yu temel alarak P'nin bilgi içeriğini ölçer; eğer P ve Q çok benzerse, KL sapma değeri sıfıra yakın olur.

2.3.2 Euclidean mesafesi

İki nokta arasındaki doğrusal mesafeyi ölçen geometrik uzaklık ölçülerinden biridir. İki vektör veya nokta arasındaki farkı ölçerken kullanılan bu yöntem, genellikle veri analizi, makine öğrenmesi ve istatistikte iki veri noktası arasındaki farklılıkları veya benzerlikleri değerlendirmek için kullanılır. Fiziksel uzaydaki en kısa mesafeyi temsil ettiği için, genellikle "doğru mesafe" olarak da adlandırılır (Krislock ve Wolkowicz 2012). Matematiksel olarak, n boyutlu bir uzayda iki vektör $x = (x_1, x_2, \cdots x_n)$ ve $y = (y_1, y_2, \cdots y_n)$ arasındaki Euclidean mesafesi aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

Bu formülde, x_i ve y_i, x ve y vektörlerinin her bir bileşenidir. Euclidean mesafesi, genellikle verilerin birbirine ne kadar yakın veya uzak olduğunu belirlemede, kümelerin içindeki veya arasındaki mesafeleri hesaplamakta kullanılır.

2.3.3 Jensen-Shannon Sapması (JSS)

Kullback-Leibler sapması (KLS) yöntemine dayalı, simetrik ve daha kararlı bir bilgi teorisi ölçüsüdür. JSS, iki olasılık dağılımı arasındaki benzerliği ölçmek için kullanılır ve KLS'nin aksine her iki dağılım arasındaki mesafeyi eşit şekilde dikkate alır, bu nedenle simetriktir ve her zaman pozitif bir değer verir. KLS'nin asimetrik yapısındaki dezavantajları gidermek için geliştirilmiş olan JSS hem KLS hem de bu iki dağılımın ortalamasını kullanarak mesafe hesaplar (Menéndez vd. 1997).

Matematiksel olarak iki olasılık dağılımı P ve Q arasındaki JSS şu şekilde tanımlanır:

$$D_{JS}(P||Q) = \frac{1}{2}D_{KL}(P||M) + \frac{1}{2}D_{KL}(Q||M) \quad (7)$$

Burada, M iki dağılımın ortalamasıdır.

$$M = \frac{1}{2}(P + Q) \quad (8)$$

JSS, olasılık dağılımlarının birbirine ne kadar benzediğini ölçmek için daha dengeli bir yöntemdir ve genellikle farklı uygulamalarda KLS'ye tercih edilir. Çünkü daha iyi bir simetri ve sınırlı değer aralığı sunar (0 ile 1 arasında).

2.3.4 Bhattacharyya mesafesi

İki olasılık dağılımı arasındaki benzerliği ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bhattacharyya mesafesi, olasılık dağılımları arasındaki örtüşme miktarını belirler. Dağılımlar arasındaki örtüşme ne kadar fazlaysa, Bhattacharyya mesafesi o kadar küçük olur, bu da dağılımların birbirine daha yakın olduğunu gösterir. Bhattacharyya mesafesi, genellikle model doğruluğunu ölçmek ve sınıflandırma görevlerinde sınıflar arasındaki ayrımı değerlendirmek için kullanılır (Nwe vd. 2013). Bhattacharyya mesafesi, iki sürekli olasılık dağılımı P(x) ve Q(x) arasında şu şekilde tanımlanır:

$$D_B(P,Q) = -\ln\left(\int \sqrt{P(x)Q(x)}dx\right) \quad (9)$$

Burada $\sqrt{P(x)Q(x)}dx$ Bhattacharyya katsayısıdır. Bhattacharyya mesafesi, bu katsayının logaritmasıyla negatif bir işaretle alınarak hesaplanır. Mesafe arttıkça dağılımlar arasındaki fark da artar. Bu yöntem, görüntü tanıma, sinyal işleme ve makine öğrenimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır.

2.3.5 Spektral enerji

İki güç spektral yoğunluğu (GSY) arasındaki enerji farkı, sinyallerin toplam enerji seviyelerindeki farkı belirlemek için hesaplanır. Enerji, bir sinyalin genliğinin karesi alınarak hesaplanır ve belirli bir frekans bandındaki toplam enerjiye odaklanır (Vidyaratne ve Iftekharuddin 2017). Enerji farkını bulmak için, her iki GSY'nin toplam enerjisi şu formülle hesaplanır:

$$E = \int_{f_1}^{f_2} GSY(f)\, df \quad (10)$$

Bu formül, f_1 ve f_2 arasındaki frekans bandında GSY'nin integralini alarak sinyalin enerjisini hesaplar. İki GSY arasındaki enerji farkı ise aşağıdaki gibi bulunur:

$$\Delta E = |E_1 - E_2| \quad (11)$$

Burada E_1 ve E_2 iki farklı sinyalin toplam enerjilerini temsil eder.

2.3.6 Spektral entropi

Spektral entropi, iki güç spektral yoğunluğu (GSY) arasındaki bilgi düzensizliğini veya belirsizliği ifade eder. Yüksek spektral entropi, sinyalin daha düzensiz ve karmaşık olduğu anlamına gelirken, düşük entropi, sinyalin daha düzenli ve belirli bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanır (Mirzaei vd. 2010).

1- GSY'nun Normalizasyonu: Öncelikle GSY'nun toplam alanı 1 olacak şekilde normalize edilmesi gerekir. Bu, her bir frekans bileşeninin olasılık dağılımı olarak yorumlanmasına olanak tanır.

$$P(f) = \frac{GSY(f)}{\sum_i GSY(f_i)} \quad (12)$$

2- Spektral Entropi Formülü: Normalleştirilmiş GSY kullanılarak spektral entropi hesaplanır. Formül şu şekildedir:

$$H = -\sum_i P(f_i) \log\big(P(f_i)\big) \quad (13)$$

Burada H, spektral entropiyi; $P(f_i)$, her bir frekans bileşeninin olasılığını temsil eder.

2.3.7 Spektral düzlük

İki güç spektral yoğunluğu (GSY) arasındaki düzensizlik ve düzlük derecesini ifade eder. Yüksek spektral düzlük, bir sinyalin daha düz (ve dolayısıyla daha az karmaşık) bir spektral yapıya sahip olduğunu gösterirken, düşük spektral düzlük, daha düzensiz ve zengin bir spektral yapıyı işaret eder (Boubchir vd. 2017). Spektral düzlük genellikle aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$Düzlük = \frac{10^{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \log_{10}(GSY(f_i))}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} GSY(f_i)} \quad (14)$$

Burada; N, toplam frekans bileşenlerinin sayısını ve $GSY(f_i)$, i-inci frekans bileşeninin gücünü temsil eder.

2.3.8 Spektral bant genişliği

İki güç spektral yoğunluğu arasında, spektrumda ne kadar geniş bir frekans aralığına yayıldığını hesaplamak için kullanılır. Daha geniş bir spektral bant, genellikle daha fazla bilgi veya karmaşıklık içerirken, dar bir bant daha basit bir yapı veya az sayıda frekans bileşeni barındırır. Spektral bant genişliği genellikle aşağıdaki formül ile hesaplanır (Liu vd. 2023).

$$Bant\ genişliği = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(f_i-\mu)^2 \cdot GSY(f_i)}{\sum_{i=1}^{N} GSY(f_i)}} \quad (15)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} f_i \cdot GSY(f_i)}{\sum_{i=1}^{N} GSY(f_i)}} \quad (16)$$

Burada; N, toplam frekans bileşenlerinin sayısını; f_i, i-inci frekans bileşeni; μ, GSY'nin ağırlıklı ortalamasını temsil eder.

2.3.9 Maksimum spektral sapma

İki güç spektral yoğunluğu arasındaki maksimum farkı ifade eden bu ölçüm, sinyallerin frekans bileşenlerinin nasıl dağıldığını ve bir sinyalin diğerine göre ne kadar farklı olduğunu değerlendirmek için kullanılır. İki GSY arasındaki maksimum spektral sapma şu şekilde hesaplanır (Niknazar vd. 2020).

$$Max\ Spektral\ Sapma = \max_i |GSY_1(f_i) - GSY_2(f_i)| \quad (17)$$

Burada; $GSY1(f_i)$ ve $GSY2(f_i)$, sırasıyla iki farklı sinyalin f_i frekansındaki güç spektral yoğunluğunu temsil eder ve i, toplam frekans bileşenlerinin indeksidir.

2.3.10 Sıfır geçiş oranı (SGO)

Bir sinyalin zaman içinde sıfır değerini geçiş sayısını ifade eder. İki sinyal arasındaki sıfır geçiş hızı farkı, bu sinyallerin değişim hızını ve dalga biçimini karşılaştırarak, hangi sinyalin daha fazla dalgalanma veya değişim gösterdiğini anlamaya yardımcı olur. Aşağıdaki şekilde hesaplanır (Kumar ve Kolekar 2014).

$$SGO = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N-1} sgn(x[i]) \neq sgn(x[i+1]) \quad (18)$$

Burada; x[i], sinyalin i-inci örneği ve sgn(x), sinyalin işaretini (pozitif veya negatif) belirler.

2.4 Sınıflandırıcılar

2.4.1 Çok katmanlı algılayıcı (ÇKA)

ÇKA, yapay sinir ağlarının bir türüdür ve veri setlerindeki karmaşık ilişkileri öğrenmek için kullanılan güçlü bir modeldir. Çok katmanlı yapısı sayesinde doğrusal olmayan problemlerde başarılıdır. Girdi verisini gizli katmanlar aracılığıyla işler ve her bir nöron, doğrusal bir dönüşümün ardından bir aktivasyon fonksiyonu ile veriyi işler. Geri yayılım algoritması ile ağırlıkları günceller ve öğrenir (Sriraam vd. 2018).

2.4.2 k-En yakın komşu (k-EYK)

k-EYK, basit ve sezgisel bir sınıflandırma algoritmasıdır. Yeni bir örneğin sınıfını tahmin etmek için, en yakın k komşusunun sınıflarına bakar ve çoğunlukla hangi sınıf varsa o sınıfı tahmin eder. Mesafe ölçümüne dayalı olduğu için yüksek boyutlu veri setlerinde dikkatle kullanılması gerekir. Parametre olarak seçilen k değeri modelin performansını önemli ölçüde etkiler (Hasan vd. 2017).

2.4.3 Rastgele orman (RO)

RO, birden çok karar ağacının oluşturduğu bir topluluk öğrenme modelidir. Her ağaç veri setinin rastgele bir alt

kümesinde eğitilir ve sonuçlar birleştirilir. Bu yöntem, aşırı öğrenmeyi önler ve genellikle yüksek doğruluk sağlar. Aynı zamanda gürültüye dayanıklıdır ve önemli özellikleri belirlemek için de kullanılabilir (Basri ve Arif 2021).

2.4.4 Lojistik model ağacı (LMA)

LMA, karar ağaçları ile lojistik regresyonu birleştiren bir sınıflandırma yöntemidir. Her yaprak düğümde lojistik regresyon modelleri kullanarak sınıflandırma yapar. Karar ağacının bölme gücünü lojistik regresyonun doğrusal sınıflandırma yeteneğiyle birleştirir, bu da daha karmaşık ilişkilerin öğrenilmesine olanak tanır (Kabir ve Zhang 2016).

2.4.5 Destek vektör makineleri (DVM)

DVM, iki sınıf arasındaki veriyi en iyi ayıran hiper düzlemi bulmaya çalışır. Amacı, sınıflar arasındaki marjini maksimize etmektir. Doğrusal olmayan verilerde de başarılıdır çünkü çekirdek fonksiyonları kullanarak veriyi daha yüksek boyutlara taşıyabilir ve burada ayrım yapabilir. Gürültüye karşı dayanıklı ve genellikle güçlü bir modeldir (Shiao vd. 2017).

2.5 Sınıflandırma sonuçlarının değerlendirilmesi

Sınıflandırıcıların doğruluk ve kesinlik değerleri, bir modelin performansını değerlendirmek için kullanılan temel ölçülerdir. Sınıflandırıcılar, verilen bir veri kümesinde doğru ve yanlış sınıflandırmalar yapabilir. Bu metrikler, modelin başarısını farklı yönlerden ölçer (Juba ve Le 2019). Doğruluk, modelin tüm sınıflandırma tahminlerinin ne kadarının doğru olduğunu gösterir. Yani, doğru pozitif (DP) ve doğru negatif (DN) tahminlerinin toplam tahminlere oranını hesaplar. Genel olarak modelin doğru sınıflandırma oranını gösterir. Modelin başarısını genel bir perspektiften değerlendirir. Ancak, dengesiz veri setlerinde (bir sınıfın çok daha fazla olduğu durumlarda) yanıltıcı olabilir. Bu tür durumlarda model, çoğunluk sınıfını tahmin ederek yüksek doğruluk elde edebilir ama diğer metriklerde düşük performans gösterebilir.

$$Doğruluk = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (19)$$

Burada;

DP (Doğru Pozitif): Modelin pozitif olarak doğru tahmin ettiği örnekler.

DN (Doğru Negatif): Modelin negatif olarak doğru tahmin ettiği örnekler.

YP (Yanlış Pozitif): Modelin pozitif olarak yanlış tahmin ettiği örnekler.

YN (Yanlış Negatif): Modelin negatif olarak yanlış tahmin ettiği örnekler.

Kesinlik, modelin pozitif olarak tahmin ettiği verilerden ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu ölçer. Yani, yanlış pozitiflerin etkisini değerlendirir. Yanlış pozitiflerin maliyetli olduğu durumlarda, kesinlik önemli bir metriktir.

$$Kesinlik = \frac{DP}{DP+YP} \quad (20)$$

3. Sonuçlar

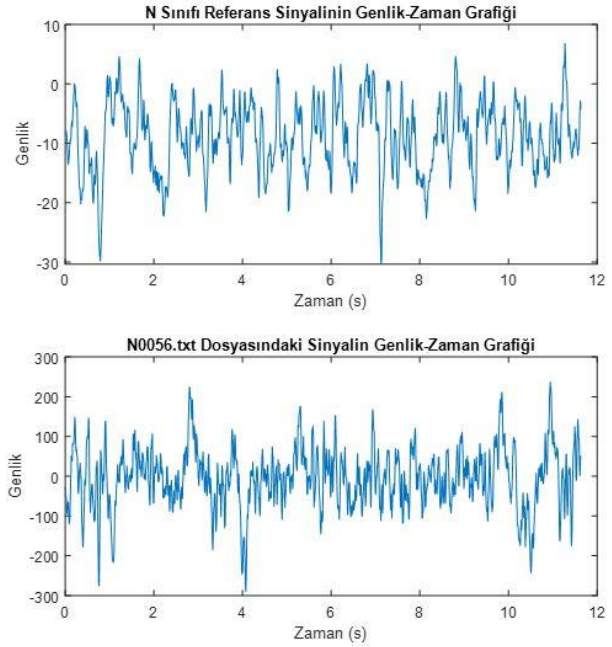
Şekil 2'deki önerilen çalışmanın blok diyagramında, Bonn Üniversitesi'nden alınan halka açık EEG veri setleri kullanılmıştır. Bu veri setleri A, B, C, D, E sınıflarına ait toplam 500 adet veri dosyasından oluşmaktadır. Sınıflandırma doğruluğunu ve kesinliğini arttırmak amacıyla, her bir sınıf 2048 örneklik 200 dosyaya ayrılmıştır.

Şekil 2. Önerilen çalışmanın blok diyagramı

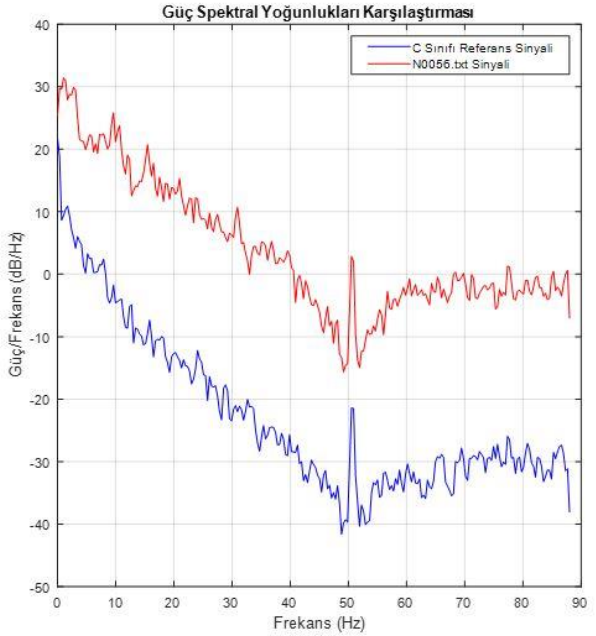
Dosyalar şu şekilde adlandırılmıştır: A sınıfı Z0001.txt-Z0200.txt, B sınıfı O0001.txt- O0200.txt, C sınıfı N0001.txt-N0200.txt, D sınıfı D0001.txt- D0200.txt, E sınıfı S0001.txt-S0200.txt.

A, B, C, D, E sınıfları için sinyallerin ortalaması alınarak 5 adet referans sinyal (Ref_A, Ref_B, Ref_C, Ref_D ve Ref_E) oluşturulmuştur. Şekil 3'te C sınıfına ait Ref_C ile rastgele

seçilen N0056.txt dosyasının genlik-zaman grafikleri verilmiştir. Çalışmanın 3. adımında, Welch yöntemiyle referans sinyalleri ve tüm sinyallerin güç spektral yoğunlukları hesaplanmıştır. Şekil 4'te Ref_C ile N0056.txt dosyasının güç spektral yoğunluklarının karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 3. C sınıfına ait referans sinyalinin ve rastgele seçilmiş N0056.txt dosyasındaki sinyalin genlik-zaman grafikleri



Şekil 4. C sınıfı referans sinyaline ait güç spektral yoğunluğunun C sınıfında yer alan rastgele seçilmiş N0056.txt sinyaline ait güç spektral yoğunluğuyla karşılaştırılması

Çalışmanın 4. adımında, veri setindeki sinyaller ve referans sinyallerine ait güç spektral yoğunlukları üzerinden; D_1: Kullback-Leibler sapması, D_2: Euclidean mesafesi, D_3: Jensen-Shannon sapması, D_4: Bhattacharya mesafesi, D_5: Spektral enerji farkı, D_6: Spektral entropi farkı, D_7: Spektral düzlük farkı, D_8: Spektral bant genişliği farkı, D_9: Maksimum spektral sapma, D_{10}: Sıfır geçiş oranı farkı hesaplanmıştır. Öznitelik vektörleri, bu analizlerden elde edilen D_1-D_{10} özelliklerini içermekte olup, Çizelge 3'te örnek değerler sunulmuştur.

Sınıflandırma aşamasında, 5 farklı yöntem kullanılarak öznitelik vektörleri ile eğitilen sınıflandırıcılar 10-kat çapraz doğrulama ile test edilmiştir. Çizelge 4, 13 farklı sınıflandırma görevinin doğruluk ve kesinlik sonuçlarını göstermektedir. Bu görevlerden 7'sinde %100 doğruluk sağlayan k-EYK yöntemi için farklı k değerlerinin sonuçları Çizelge 5'te, k=1 durumunda A-B-C-D-E sınıflandırmasına ait karışıklık matrisi ise Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 4'teki sonuçlara göre;

- ÇKA ortalama %97,29 doğruluk ile iyi bir performans göstermiş, A-E, B-E ve C-E görevlerinde %100 doğruluk sağlamıştır.
- k-EYK (k=1) %98,04 ortalama doğruluk ile en iyi performansı sergileyen algoritma olup, 7 görevde %100 başarı elde etmiştir.
- RO %97,93 ortalama doğruluk ile k-EYK'nun hemen ardından gelir. Ancak özellikle D-E görevinde diğer yöntemlere kıyasla daha düşük sonuçlar almıştır.
- LMA %98,23 ortalama doğruluk ile en yüksek performansı sunmuştur. A-E, B-E ve ABCD-E görevlerinde %100 doğruluk sağlarken, karmaşık görevlerde performansı bir miktar düşmüştür.
- DVM %90,68 ortalama doğrulukla diğer algoritmaların gerisinde kalmıştır. D-E ve A-B-C-D-E gibi görevlerde düşük doğruluk (%74,7'ye kadar) elde etmiştir.

Çoklu sınıflı görevlerde, k-EYK ve LMA tutarlı sonuçlar verirken, DVM ve RO performans açısından geride kalmıştır. Özellikle DVM, A-B-C-D-E görevinde en düşük doğruluk değerine sahiptir.

Çizelge 5'te, k-EYK sınıflandırıcısının farklı k değerleri için doğruluk ve kesinlik sonuçları karşılaştırılmaktadır. k parametresi, komşu sayısını belirler ve bu değer arttıkça sınıflandırma performansında değişiklikler gözlenir.

- k=1: En yüksek doğruluk ve kesinlik değerleri elde edilmiştir. A-E, B-E ve C-E gibi basit sınıflandırma görevlerinde %100 doğruluk ve kesinlik sağlanmıştır. Küçük k değerleri, sınıflar arasındaki komşuluk ilişkilerini daha iyi yansıtarak üstün performans göstermektedir.

Çizelge 3. A, B, C, D, E veri setlerinde rastgele seçilmiş ikişer sinyal için hesaplanan öznitelik vektörleri.

Veri seti	Öznitelik Vektörü									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
Set A	11072	486	724	-5,728	2312	2135	0,0191	5,8362	191	0,1099
Set A	13372	928	956	-6,056	3075	3268	0,0237	3,4767	660	0,0889
Set B	41317	2733	2813	-7,180	9124	11790	0,0294	4,9428	1907	0,1060
Set B	36561	1390	2197	-6,782	6951	7774	0,1226	7,6117	501	0,1523
Set C	32507	2907	2345	-6,929	7506	10544	0,0026	0,8843	1656	0,0215
Set C	39855	3789	2892	-7,068	9167	13413	0,0004	0,6114	2269	0,0137
Set D	61903	3182	4144	-7,189	12813	16691	0,0345	2,9879	1517	0,0308
Set D	50137	4059	3682	-7,233	11545	16146	0,0078	0,6435	2940	0,0264
Set E	53224	3586	4606	-8,331	16796	23116	0,0083	1,3982	1402	0,0273
Set E	57632	3470	5006	-8,386	18171	24368	0,0014	0,4685	1428	0,0444

Çizelge 4. Farklı sınıflandırma görevleri için ÇKA, k-EYK, RO, LMA ve DVM (lineer kernel) sınıflandırıcılarının doğruluk ve kesinlik değerleri.

Sınıflandırma görevi (Setler) (2048 örnek)	Sınıflandırıcı									
	ÇKA		k-EKY (k=1)		RO		LMA		DVM	
	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik
A-E	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000
B-E	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000
C-E	100	1,000	100	1,000	99,75	0,998	100	1,000	100	1,000
D-E	99,75	0,998	100	1,000	98,50	0,985	99,50	0,995	99,50	0,995
AB-CD-E	95,60	0,957	99,10	0,991	98,70	0,987	99,50	0,995	84,50	0,846
A-B-E	100	1,000	100	1,000	99,50	0,998	99,83	0,998	88,33	0,885
ABCD-E	99,90	0,999	100	1,000	99,60	0,996	100	1,000	99,90	0,999
A-B-C-D-E	89,20	0,892	93,00	0,931	93,70	0,936	94,70	0,947	74,70	0,747
A-C	100	1,000	100	1,000	98,50	0,985	99,25	0,993	99,75	0,998
C-D	84,75	0,848	83,50	0,836	88,00	0,880	85,75	0,858	57,75	0,578
CD-E	99,83	0,998	100	1,000	99,16	0,992	100	1,000	99,66	0,997
A-D	99,25	0,993	99,50	0,995	99,00	0,990	99,50	0,995	98,25	0,983
AB-CDE	96,60	0,967	99,50	0,995	98,70	0,987	99,00	0,990	76,60	0,784
Ortalama doğruluk (%) (Tüm görevler)	97,29		98,04		97,93		98,23		90,68	

Çizelge 5. Farklı k değerleri için k-EYK sınıflandırma yönteminin sunulan çalışmada doğruluk ve kesinlik değerleri.

Sınıflandırma görevi (Setler) (2048 örnek)	Sınıflandırıcı									
	k-EKY (k=1)		k-EKY (k=3)		k-EKY (k=5)		k-EKY (k=7)		k-EKY (k=9)	
	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik	Doğruluk (%)	Kesinlik
A-E	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000
B-E	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000	100	1,000
C-E	100	1,000	100	1,000	99,50	0,995	99,25	0,993	99,25	0,993
D-E	100	1,000	99,00	0,990	98,75	0,988	98,50	0,985	98,50	0,985
AB-CD-E	99,10	0,991	97,60	0,977	97,20	0,972	96,20	0,962	95,90	0,959
A-B-E	100	1,000	99,83	0,998	99,50	0,995	98,83	0,989	98,33	0,983
A-B-C-D-E	93,00	0,931	91,40	0,916	89,90	0,902	89,40	0,899	87,30	0,880

Çizelge 6. A-B-C-D-E beşli sınıflandırma görevi için k-EYK (k=1) sınıflandırıcıda elde edilen karışıklık matrisi.

		Tahmin Edilen Sınıf				
	k-EYK	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
Gerçek Sınıf	**A**	197	0	3	0	0
	B	0	198	1	1	0
	C	1	0	169	30	0
	D	0	0	34	166	0
	E	0	0	0	0	200

- k=3: Daha karmaşık görevlerde (ör. AB-CD-E), doğruluk %99,10'dan %97,60'a gerilemiştir.
- k=5 ve üzeri: Karmaşık görevlerde performans daha belirgin şekilde düşmektedir. Örneğin, A-B-C-D-E görevinde doğruluk k=1'de %93,00 iken k=9'da %87,30'a kadar gerilemiştir.

Basit görevlerde (A-E, B-E, C-E, D-E), tüm k değerlerinde genellikle %100 doğruluk ve kesinlik sağlanmıştır. Ancak, k arttıkça özellikle C-E ve D-E görevlerinde küçük doğruluk düşüşleri görülmektedir, örneğin D-E görevi için k=9'da doğruluk %98,50'dir. Küçük k değerleri, özellikle çok sınıflı görevlerde daha yüksek doğruluk ve kesinlik sağlamaktadır. Büyük k değerlerinde ise sınıflar arası sınırlar bulanıklaşmakta ve performans düşmektedir. Çizelge 6'daki karışıklık matrisi incelendiğinde sınıflar arasındaki performans ve karışıklıklar şu şekilde özetlenebilir:

- A Sınıfı: 200 örnekten 197'si doğru sınıflandırılmış, 3 örnek ise yanlışlıkla C sınıfına atanmıştır. Bu durum, A sınıfının genelde doğru sınıflandırıldığını, ancak bazı durumlarda C sınıfıyla karışabileceğini göstermektedir.
- B Sınıfı: 200 örnekten 198'i doğru sınıflandırılmıştır. Yanlış sınıflandırılan 2 örnekten biri C sınıfına, diğeri ise D sınıfına atanmıştır. Bu sınıf için sınıflandırma oldukça başarılıdır.
- C Sınıfı: 200 örnekten 169'u doğru sınıflandırılmıştır. 30 örnek D sınıfına, 1 örnek ise A sınıfına atanmıştır. Bu, C ve D sınıfları arasında belirgin bir karışıklık olduğunu ve sınırların net olmadığını ortaya koymaktadır.
- D Sınıfı: 200 örnekten 166'sı doğru sınıflandırılmış, 34 örnek ise yanlışlıkla C sınıfına atanmıştır. D sınıfının da C sınıfıyla karıştığı ve modelin bu iki sınıfı ayırt etmekte zorlandığı gözlemlenmiştir.
- E Sınıfı: 200 örneğin tamamı doğru sınıflandırılmıştır (%100 doğruluk). Bu, modelin en iyi performansını E sınıfında gösterdiğini göstermektedir.

Model, A, B ve E sınıflarında yüksek doğruluk elde ederken, C ve D sınıfları arasında belirgin bir karışıklık bulunmaktadır. Bu, özellikle bu iki sınıfın ayrımını güçlendirmek için daha hassas özellikler veya farklı sınıflandırma yöntemlerinin gerekli olabileceğini göstermektedir.

Sunulan çalışmada seçilen sınıflandırma görevlerinde örnek dengesizliği olmayan görevler A-E, B-E, C-E, D-E, A-B-E, A-C, C-D, A-D, A-B-C-D-E şeklindedir. Bu görevlerde her sınıf eşit sayıda örnek içerdiği için, sınıf içi performansları eşit ağırlıkta değerlendiren makro ortalama tercih edilmiştir. Örnek dengesizliği bulunan görevler ise AB-CD-E, ABCD-E, CD-E, AB-CDE şeklindedir. Bu görevlerde ise sınıf örnek sayılarındaki farklılıkları dikkate almak için, sınıfların örnek sayılarına göre ağırlıklandırma yapan ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılmıştır.

WEKA programı tarafından gerçekleştirilen özellik önemi analizi ise Çizelge 7 sunulmuştur. Bu çizelgeden spektral düzlük farkı dışında seçilen tüm öznitelik vektörlerinin sınıflandırmaya dengeli bir katkı sağladıklarını, Bhattacharya mesafesinin ise en önemli öznitelik olarak öne çıktığını söylemek mümkündür.

Çizelge 7. WEKA programının sıralanmış özellikleri ile öznitelik vektörlerinin A-B-C-D-E görevi için önem puanları.

Öznitelik (D) Vektörü	Özellik Önem Sıralaması	Önem Puanı
Kullback-Leibler sapması (D_1)	6	0,725
Euclidean mesafesi (D_2)	7	0,677
Jensen-Shannon sapması (D_3)	3	0,757
Bhattacharya mesafesi(D_4)	1	1,064
Spektral enerji farkı (D_5)	4	0,753
Spektral entropi farkı (D_6)	5	0,746
Spektral düzlük farkı (D_7)	10	0,189
Spektral bant genişliği farkı (D_8)	8	0,652
Maksimum spektral sapma (D_9)	9	0,632
Sıfır geçiş oranı farkı (D_{10})	2	0,791

4. Tartışma

Bonn Üniversitesi Epileptoloji Bölümü'nden alınan EEG veri seti kullanılarak, otomatik olarak epileptik nöbetlerin tespiti için sunulan bu çalışmada, ilk olarak gerçekleştirilen veri setinde yer alan sinyallerin ikiye bölünmesi işlemi önemlidir. Yapılan bu bölme işlemi sinyalin frekans ve zaman analizinde önemli bir rol oynar. Sinyali 200 parçaya bölmek, 100 parçaya bölmeye kıyasla daha fazla veri noktası sağladığı için, sinyalin frekans bileşenlerini daha ince detaylarla yakalamaya olanak tanır. Bu, özellikle düşük frekanslardaki bileşenleri daha iyi anlamaya ve analiz etmeye yardımcı olabilir. Sınıflandırma algoritmalarında, daha fazla örnek kullanmak modelin genelleme yeteneğini artırabilir. 200 bölüm, 100 bölüme göre daha fazla veri sağlayarak makine öğrenme algoritmalarının daha iyi performans göstermesine olanak tanıyacaktır. Ayrıca sinyali daha küçük parçalara bölmek, zaman içerisinde sinyalin nasıl değiştiğini daha iyi inceleme şansı verir, bu da sinyaldeki önemli örüntüleri tespit etmek açısından faydalı olacaktır.

Sunulan çalışmada diğer önemli bir nokta, her sınıf için bir referans sinyal oluşturulması ve bu referans sinyalin spektral özelliklerini kendi sınıfı içerisinde yer alan sinyal parçaları ile karşılaştırılması, sınıf içi tutarlılığın ölçülmesi, anormal sinyallerin tespiti, sınıflar arası ayrımı kolaylaştırma, özellik azaltımı ve model basitleştirme ile sinyal dinamiklerinin iyi kavranması açılarından önemlidir. Referans sinyal, her sınıfın genel spektral özelliklerini temsil eder. Sınıftaki bireysel parçaların bu referans sinyale ne kadar benzediğini karşılaştırmak sınıf içindeki sinyallerin tutarlılığı hakkında bilgi verecektir. Bu da sınıflandırma süreçlerinde sınıf içi değişmenin ne kadar düşük olduğunun anlaşılmasını kolaylaştıracaktır.

Referans sinyalden önemli ölçüde sapma gösteren sinyal parçaları, potansiyel olarak anormal ya da farklı özellikler taşıyan sinyaller olarak işaretlenebilir. Özellikle epilepsi gibi sinyallerin anormal örüntüler içerdiği durumlarda bu karşılaştırma, nöbet sinyallerini tespit etmede kullanılabilir. Her sınıf için oluşturulan referans sinyallerin spektral özellikleri, sınıflar arasında belirgin farklar olup olmadığını gösterebilir. Bu farklar, sınıfların birbiriyle karışmamasını sağlamak için kullanmak ve sınıflandırma algoritmaları için daha güçlü ayrıştırıcı özellikler elde etmeyi sağlayacaktır. Tüm parçalar yerine sadece referans sinyallerin spektral özellikleri üzerinden bir model oluşturmak ise, daha az veri kullanarak benzer performans elde edebilmeyi mümkün kılar. Referans sinyal, her sınıfın genel dinamiklerini yansıttığı için, bu dinamiklerin anlaşılması ve bu dinamiklere göre sinyal parçalarının karşılaştırılması ile, sinyalin sınıfa özgü örüntülerinin daha iyi kavranması mümkündür. Örneğin, nöbet öncesi ve nöbet anı sinyalleri referans sinyale göre farklılık gösterebilir. Sonuç olarak bu tür bir yaklaşım, spektral analiz ve sınıflandırma aşamalarında daha güvenilir ve güçlü bir model elde etmeye katkı sağlayacaktır.

Gerçekleştirilen çalışmada yöntemini tercih etmemizin sebepleri arasında, gürültü ve varyans azaltımı, pencerelenmiş veri kullanması, frekans çözünürlüğü ile kısa ve uzun sinyal boyutlarında esneklik sağlaması gösterilebilir.

Sunulan çalışmada D öznitelik vektörünü oluşturan özellikler sırasıyla; D_1: Kullback-Leibler sapması, D_2: Euclidean mesafesi, D_3: Jensen-Shannon sapması, D_4: Bhattacharya mesafesi, D_5: Spektral enerji farkı, D_6: Spektral entropi farkı, D_7: Spektral düzlük farkı, D_8: Spektral bant genişliği farkı, D_9: Maksimum spektral sapma, D_{10}: Sıfır geçiş oranı farkı olarak alınmıştır. Bu öznitelik vektörünü oluşturan 10 farklı özellik içinde Kullback-Leibler sapması özellikle sinyallerin frekans bileşimindeki küçük değişiklikleri iyi yakalar, bu da farklı sınıflar arasındaki spektral değişiklikleri belirlemekte çalışmada fayda sağlamıştır. Euclidean mesafesi ise spektral yoğunluklar arasında büyük farklar varsa, bu farkları iyi yansıtacaktır. Jensen-Shannon sapması sinyallerin genel benzerliğini iyi tespit etmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bhattacharya mesafesi özellikle spektral yoğunlukların büyük ölçüde örtüştüğü durumlarda farkları anlamamıza yardımcı olmuştur. Spektral enerji farkı, sinyalin genel güç yapısındaki farklılıkları incelememizi sağlamıştır. Spektral entropi, sinyallerin kaotik ya da düzenli olup olmadığını analiz eden bu teknikten EEG sinyallerinde, yüksek karmaşıklık içeren epileptik nöbet anlarının tespitinde yararlanılmıştır. Spektral düzlük, sinyalin spektrumunun ne kadar düz ya da tepecikli olduğunu ölçen bir yöntemdir. Daha düz bir spektrum, beyaz gürültü gibi sinyalleri işaret ederken, daha belirgin tepecikler daha düzenli frekans bileşenlerine işaret eder. Bu farkları analiz ederek, sınıflar arasındaki spektral yapıların belirlenmesinde spektral düzlükten faydalanılmıştır. Spektral bant genişliğinden, farklı sınıfların farklı frekans bantlarında yoğunlaşan sinyallerinin ayrılmasında yararlanılmıştır. Maksimum spektral sapma, referans sinyale göre sinyalin hangi frekans bileşenlerinde en büyük sapmayı gösterdiğini tespit eder. Bu özellik, sınıflar arasındaki en belirgin farkları ortaya koymaktadır. Zaman bölgesinde gerçekleştirdiğimiz tek analiz olan sıfır geçiş oranı ise sinyalin ne kadar sıklıkla sıfırdan geçtiğini ölçer ve bu da sinyaldeki yüksek frekanslı bileşenlerin varlığını işaret eder. Özellikle nöbet anlarındaki hızlı değişim içeren sinyalleri tespit etmekte kullanılmıştır.

Epileptik nöbetler ve sağlıklı durum arasındaki farklılıklar, beynin elektriksel aktivitesindeki anormalliklerden kaynaklanır. Bu durumlar genellikle inhibisyon-eksitasyon dengesinin bozulması, nöronal senkronizasyonun artması ve beyin hücrelerindeki iyon dengesizlikleri ile ilişkilidir. Özellikle nöbetlerin türüne, beynin etkilenen bölgesine ve bireyin fizyolojik durumuna bağlı olarak bu farklılıklar değişkenlik gösterebilir. Epileptik nöbetler sırasında sinyallerde ani değişimler ve frekans yoğunluğunda farklılıklar gözlemlenir. Bu durum, doğrusal sınıflandırıcılar yerine doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilen algoritmaların daha iyi performans göstermesini sağlamıştır. Veri setindeki E sınıfının (epileptik nöbet) diğer sınıflardan daha belirgin farklılıklar göstermesi, bazı sınıflandırıcıların bu farkları daha kolay algılamasına olanak tanımıştır. Örneğin, RO ve k-EYK (k=1) bu ayırımları daha hassas bir şekilde yakalamıştır. RO, karar ağaçlarından oluşan bir topluluk yöntemidir ve veri setindeki varyans ile hatayı azaltır. Özellikle karmaşık sınıflandırma görevlerinde (AB-CD-E, A-B-C-D-E gibi), sınıflar arasındaki sınırları etkili bir şekilde öğrenebilir. Çok sayıda özellikten bilgi çıkarabilmesi ve aşırı öğrenme riskini minimize etmesi nedeniyle, spektral özelliklerin yoğun kullanıldığı EEG sinyallerinde yüksek doğruluk sağlamıştır. k-En Yakın Komşu (k-EYK), parametrik olmayan yapısı sayesinde, veri setindeki ayrımları net bir şekilde yansıtmaktadır. Özellikle küçük k değerlerinde, sınıf sınırlarına yakın örnekleri daha hassas şekilde sınıflandırmıştır. Ancak k değerinin artırılmasıyla sınıflar arasındaki farklar bulanıklaşmıştır, bu da karmaşık görevlerde doğruluğun düşmesine neden olmuştur. Lojistik Model Ağacı (LMA), lojistik regresyonun esnekliği ile karar ağacının açıklanabilirliğini birleştirerek özellikle

düşük boyutlu veri setlerinde ve daha basit sınıflandırma görevlerinde güçlü performans göstermiştir. Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA)'nın, çok katmanlı yapısı, özellikler arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenme yeteneğini arttırmıştır. Ancak, eğitim sırasında parametre ayarlarının hassasiyet gerektirmesi nedeniyle bazı görevlerde performans dalgalanmaları görülmüştür. Destek Vektör Makineleri (DVM), doğrusal karar sınırlarına dayalı bir algoritmadır ve yüksek boyutlu veri setlerinde performans düşüşü yaşamıştır. Bu nedenle özellikle çok sınıflı görevlerde, sınıf sınırlarının bulanıklaşması nedeniyle doğruluk oranları düşmüştür. Epileptik nöbet sırasında sinyallerde yüksek frekanslı bileşenler, spektral enerji artışı ve düşük entropi gibi özellikler ön plana çıkmaktadır. Bu farklılıklar, özellikle RF ve k-EYK gibi algoritmalar tarafından daha iyi yakalanmıştır. Spektral düzeydeki bu belirgin farklar, nöbetli (E) ve nöbetsiz (A, B, C, D) sinyallerin kolay ayrılmasını sağlamaktadır. Sunulan çalışmada RO ve k-EYK'nin en yüksek performansı göstermesi, yukarıda açıklanan nedenlere dayanmaktadır. Özellikle nöbetli sinyallerin spektral enerji, entropi ve diğer istatistiksel özellikler açısından belirgin farklar içermesi, bu algoritmaların doğruluğunu artırmıştır.

Bazı sınıflandırma görevlerinde elde edilen %100 doğruluk oranı, modelin veri setindeki sınıflar arasındaki belirgin farkları başarılı bir şekilde yakaladığını göstermektedir. Özellikle nöbetli (E) ve nöbetsiz (A, B, C, D) sinyallerin spektral özelliklerindeki bariz farklılıklar, bu sonuçların temel nedenlerinden biridir. Bu durum, nöbetli sinyallerin güçlü frekans değişimleri, yüksek enerji yoğunluğu veya spektral entropi gibi özelliklerle nöbetsiz sinyallerden kolaylıkla ayrılabilmesine dayanmaktadır. Ayrıca, kullanılan veri setinin homojen ve gürültüsüz yapısı, doğru öznitelik çıkarma yöntemleri ve dengeli örnek dağılımı, modelin hata yapma olasılığını azaltarak bu yüksek başarıya katkı sağlamıştır.

Ancak, mevcut veri setinde her sınıf için 200 örnek bulunması ve bu örneklerin sınıf içi özelliklerinin oldukça tutarlı olması, modelin öğrenme sürecini kolaylaştırmış olabilir. Örnek sayısının artırılması, özellikle gerçek dünya uygulamalarında gözlemlendiği gibi, veri çeşitliliğinin artmasına ve potansiyel olarak daha karmaşık sinyal örüntülerinin sisteme dahil edilmesine yol açacaktır. Bu durumda, modelin %100 doğruluk oranını sürdürmesi daha zor hale gelebilir. Çünkü daha fazla veri, sınıf içi çeşitliliğin artmasına ve sınıflar arası ayrımların daha az belirgin hale gelmesine neden olabilir.

Bununla birlikte, veri sayısının artması, modelin genelleme yeteneğini ve gerçek dünya verilerine uygulanabilirliğini de geliştirebilir. Bu nedenle, %100 doğruluk oranlarının düşme ihtimali, modelin daha geniş ve çeşitli veri kümelerinde daha güvenilir bir performans sergileyebilmesi için bir gereklilik olarak da görülebilir.

Elde edilen sonuçların ışığı altında, çalışmada sunulan modelin otomatik nöbet tespitinde epileptik nöbetleri %100 doğruluk ile ayırarak çok başarılı olduğunu söylemek mümkündür. Genel olarak LMA ve k-EYK (k=1) algoritmaları, sınıflandırmada en yüksek performansı sunmuştur. Özellikle içinde epileptik nöbet anlarının yani E sınıfının bulunduğu 7 sınıflandırma görevinde %100 doğruluk ve 1,000 kesinlik değerlerinin elde edildiği k-EYK sınıflandırıcısının seçimi, modelin amacına daha uygun görülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kavramsallaştırma, Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Doğrulama, Yazılım, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Biçimsel analiz, İnceleme ve düzenleme

Yazar 2: Kavramsallaştırma, Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Görselleştirme, İnceleme ve düzenleme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışmada kullanılan veriler açık kaynaklıdır.

5. Kaynaklar

Al-Hadeethi, H., Abdulla, S., Diykh, M., Deo, R.C. and Green, J.H., 2020. Adaptive boosts LS-SVM classification approach for time-series signal classification in epileptic seizure diagnosis applications. *Expert Systems with Applications*, **161**, 113676. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113676

Alkan, A. and Kiymik, M.K., 2006. Comparison of AR and Welch methods in epileptic seizure detection. *Journal of Medical Systems*, **30**, 413-419. https://doi.org/10.1007/s10916-005-9001-0

Alotaiby, T.N., Alshebeili, S.A., Abd El-Samie, F.E., Alabdulrazak, A. and Alkhnaian, E., 2016. Channel selection and seizure detection using a statistical approach. *In 2016 5th international conference on electronic devices, systems and applications (ICEDSA)*. Ras Al Khaimah, United Arab Emirates, 1-4. https://doi.org/10.1109/ICEDSA.2016.7818505

Basri, A. and Arif, M., 2021. Classification of seizure types using random forest classifier. *Advances in Science and Technology Research Journal*, **15**(3), 167–178. https://doi.org/10.12913/22998624/140542

Birjandtalab, J., Pouyan, M.B., Cogan, D., Nourani, M. and Harvey, J., 2017. Automated seizure detection using

limited-channel EEG and non-linear dimension reduction. *Computers in biology and medicine*, **82**, 49-58. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.01.011

Boubchir, L., Daachi, B. and Pangracious, V., 2017. A review of feature extraction for EEG epileptic seizure detection and classification. *In 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. Barcelona, Spain, 456-460. https://doi.org/10.1109/TSP.2017.8076027

Choubey, H. and Pandey, A., 2019. A new feature extraction and classification mechanisms For EEG signal processing. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, **30**, 1793-1809. https://doi.org/10.1007/s11045-018-0628-7

Eltrass, A.S., Tayel, M.B. and EL-qady, A.F., 2021. Automatic epileptic seizure detection approach based on multi-stage Quantized Kernel Least Mean Square filters. *Biomedical Signal Processing and Control*, **70**, 103031.

Gabr, R.H., Shahin, A.I., Sharawi, A.A. and Aouf, M., 2020. A deep learning identification system for different epileptic seizure disease stages. *Journal of Engineering and Applied Science*, **67**(4), 925-944.

Gao, X., Yan, X., Gao, P., Gao, X. And Zhang, S., 2020. Automatic detection of epileptic seizure based on approximate entropy, recurrence quantification analysis and convolutional neural networks. *Artificial intelligence in medicine*, **102**, 101711. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101711

Harpale, V., and Bairagi, V., 2021. An adaptive method for feature selection and extraction for classification of epileptic EEG signal in significant states. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, **33**(6), 668-676. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.04.014

Hasan, M.K., Ahamed, M.A., Ahmad, M. and Rashid, M.A., 2017. Prediction of epileptic seizure by Analysing time series EEG signal using k-NN classifier. *Applied bionics and biomechanics*, **2017**(1), 6848014. https://doi.org/10.1155/2017/6848014

Jana, G.C., Praneeth, M.S. and Agrawal, A., 2023. A multi-view SVM approach for seizure detection from single channel EEG signals. *IETE Journal of Research*, **69**(6), 3120-3131. https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1913074

Ji, S., Zhang, Z., Ying, S., Wang, L., Zhao, X. and Gao, Y., 2020. Kullback–Leibler divergence metric learning. *IEEE transactions on cybernetics*, **52**(4), 2047-2058. https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3008248

Jiang, Y., Chen, W. and You, Y., 2020. Scattering transform-based features for the automatic seizure detection. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, **40**(1), 77-89. https://doi.org/10.1016/j.bbe.2019.11.002

Juba, B. and Le, H.S., 2019. Precision-recall versus accuracy and the role of large data sets. *In Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. Honolulu, Hawaii, USA, 4039-4048. https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33014039

Kabir, E.S. and Zhang, Y., 2016. Epileptic seizure detection from EEG signals using logistic model trees. *Brain informatics*, **3**, 93-100. https://doi.org/10.1007/s40708-015-0030-2

Krislock, N. and Wolkowicz, H., 2012. Euclidean Distance Matrices and Applications. In Handbook on Semidefinite, Conic and Polynomial Optimization. International Series in Operations Research & Management Science, vol 166. Springer, New York, NY, 879-914. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0769-0_30

Kumar, A. and Kolekar, M.H., 2014. Machine learning approach for epileptic seizure detection using wavelet analysis of EEG signals. *In 2014 International Conference on Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom)*, Greater Noida, India, 412-416. https://doi.org/10.1109/MedCom.2014.7006043

Li, M., Sun, X., Chen, W., Jiang, Y. and Zhang, T., 2019. Classification epileptic seizures in EEG using time-frequency image and block texture features. *IEEE Access*, **8**, 9770-9781. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960848

Liu, S., Wang, J., Li, S. and Cai, L., 2023. Epileptic seizure detection and prediction in EEGS using power spectra density parameterization. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **31**, 3884-3894. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3317093

Mandhouj, B., Cherni, M.A. and Sayadi, M., 2021. An automated classification of EEG signals based on spectrogram and CNN for epilepsy diagnosis. *Analog integrated circuits and signal processing*, **108**(1), 101-110. https://doi.org/10.1007/s10470-021-01805-2

Menéndez, M.L., Pardo, J.A., Pardo, L. and Pardo, M.C., 1997. The jensen-shannon divergence. *Journal of the Franklin Institute*, **334**(2), 307-318. https://doi.org/10.1016/S0016-0032(96)00063-4

Milligan, T.A., 2021. Epilepsy: a clinical overview. *The American Journal of Medicine*, **134**(7), 840-847. https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2021.01.038

Miltiadous, A., Tzimourta, K.D., Giannakeas, N., Tsipouras, M.G., Glavas, E., Kalafatakis, K. and Tzallas, A.T., 2022. Machine learning algorithms for epilepsy detection based on published EEG databases: A systematic review. *IEEE Access*, **11**, 564-594. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3232563

Mirzaei, A., Ayatollahi, A., Gifani, P. and Salehi, L., 2010. Spectral entropy for epileptic seizures detection. *In 2010 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*. Liverpool, UK, 301-307. https://doi.org/10.1109/CICSyN.2010.84

Niknazar, H., Mousavi, S.R., Niknazar, M., Mardanlou, V. and Coelho, B.N., 2020. Performance analysis of EEG seizure detection features. *Epilepsy Research*, **167**, 106483. https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2020.106483

Nogay, H.S. and Adeli, H., 2021. Detection of epileptic seizure using pretrained deep convolutional neural network and transfer learning. *European neurology*, **83**(6), 602-614. https://doi.org/10.1159/000512985

Nwe, T.L., Hieu, N.T. and Limbu, D.K., 2013. Bhattacharyya distance based emotional dissimilarity measure for emotion classification. *In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver*, BC, Canada, 7512-7516. https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6639123

Pal, H. and Kumar, A., 2023. Stability analysis of multiscale bubble entropy and power metric-based seizure detection technique with MLA. *IETE Journal of Research*, **69**(6), 3455-3466. https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1912650

Polat, K. and Nour, M., 2020. Epileptic seizure detection based on new hybrid models with electroencephalogram signals. *IRBM*, **41**(6), 331-353. https://doi.org/10.1016/j.irbm.2020.06.008

Paul, Y., 2018. Various epileptic seizure detection techniques using biomedical signals: a review. *Brain informatics*, **5**, 1-19. https://doi.org/10.1186/s40708-018-0084-z

Quintero-Rincón, A., d'Giano, C. and Batatia, H., 2020. A quadratic linear-parabolic model-based EEG classification to detect epileptic seizures. *Journal of Biomedical Research*, **34**(3), 205. https://doi.org/10.7555/JBR.33.20190012

Saini, J. and Dutta, M., 2018. Epilepsy classification using optimized artificial neural network. *Neurological Research*, **40**(11), 982-994. https://doi.org/10.1080/01616412.2018.1508544

Sharmila, A. and Mahalakshmi, P., 2017. Wavelet-based feature extraction for classification of epileptic seizure EEG signal. *Journal of medical engineering & technology*, **41**(8), 670-680. https://doi.org/10.1080/03091902.2017.1394388

Shiao, H.T., Cherkassky, V., Lee, J., Veber, B., Patterson, E. E., Brinkmann, B.H. and Worrell, G.A., 2016. SVM-based system for prediction of epileptic seizures from iEEG signal. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **64**(5), 1011-1022. https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2586475

Siddiqui, M.K., Huang, X., Morales-Menendez, R., Hussain, N. and Khatoon, K., 2020. Machine learning based novel cost-sensitive seizure detection classifier for imbalanced EEG data sets. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1491-1509. https://doi.org/10.1007/s12008-020-00715-3

Sriraam, N., Raghu, S., Tamanna, K., Narayan, L., Khanum, M., Hegde, A. S. and Kumar, A. B., 2018. Automated epileptic seizures detection using multi-features and multilayer perceptron neural network. *Brain Informatics*, **5**(2), 10. https://doi.org/10.1186/s40708-018-0088-8

Vidyaratne, L.S. and Iftekharuddin, K.M., 2017. Real-time epileptic seizure detection using EEG. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **25**(11), 2146-2156. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2017.2697920

Wang, Z., Na, J. and Zheng, B., 2020. An improved k-NN classifier for epilepsy diagnosis. *IEEE Access*, **8**, 100022-100030. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2996946

Zhang, J., Wei, Z., Zou, J. and Fu, H., 2020. Automatic epileptic EEG classification based on differential entropy and attention model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **96**, 103975. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103975

Zhao, X., Zhang, R., Mei, Z., Chen, C. and Chen, W., 2019. Identification of epileptic seizures by characterizing instantaneous energy behavior of EEG. *IEEE Access*, 70059-70076. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919158

İnternet kaynakları

1- National Institute of Neurological Disorders and Stroke. http://www.ninds.nih.gov/(23.08.2024)

2- World Health Organization, https://www.who.int/, (23.08.2024)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1574925
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 047202 (969-983)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 047202 (969-983)

Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali Tasarımı, Ekonomik ve Çevresel Analizi (Hatay İli Örneği)

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 28.09.2024
Kabul/Accepted: 14.03.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Rooftop Solar Power Plant Design, Economic and Environmental Analysis (Hatay Province Example)

İsa KAMACI[1*], Ahmet YÖNETKEN[2]

[1] *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı, Afyonkarahisar, Türkiye*
[2] *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışma Hatay ilinin iklim şartları ve elektrik talepleri göz önünde bulundurularak çatı üstü güneş enerji santrali tasarımının ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. PVsyst programının 7.4 sürümü kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarla, yatırım maliyeti, elektrik üretimi ve geri dönüş süresi gibi ekonomik unsurlar üzerinde odaklanılmıştır. Çevresel analizde ise güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünün karbon emisyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tasarlanan sistemin ekonomik ömrü 25 yıl olarak varsayılmış ve simülasyon sonucunda yılda 352.043 kWh enerji üretimi, %81,20 performans oranı ve 4,2 yıl geri ödeme süresi elde edilmiştir. Sistemin ekonomik ömrü boyunca 3543,4 ton karbon emisyonunun önlenmesi ve ihtiyaç fazlası enerjinin şebekeye aktarılabilmesi de projenin çevresel ve ekonomik faydalarını ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçları 2023 yılında gerçekleşen Kahramanmaraş depremleri sonrası yeniden yapılanma sürecinde olan bölgeler için güneş enerjisi projelerinin tasarımı ve uygulanmasında önemli bir rehber niteliği taşımakta olup yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının Hatay örneğinde incelenmesinin, sürdürülebilir yeniden yapılanma için benzer analizlerin diğer bölgeler için de yapılmasına ve benzer sistemlerin uygulanmasına öncülük edebileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler *Yenilenebilir Enerji; Çatı Güneş Enerji Santrali; İklim Değişikliği; PVsyst; Sıfır Emisyon.*

Abstract

This study aims to evaluate the economic and environmental impacts of designing a rooftop solar power plant in Hatay, considering the region's climatic conditions and electricity demand. Simulations conducted using PVsyst software version 7.4 focused on economic factors such as investment cost, electricity generation, and payback period. In the environmental analysis, the impact of solar energy conversion on carbon emissions was examined. The designed system was assumed to have an economic lifes of 25 years, and the simulation results indicated an annual energy production of 352,043 kWh, a performance ratio of 81.20%, and a payback period of 4.2 years. Over its economic lifespan, the system is expected to prevent 3,543.4 tons of carbon emissions and enable the transfer of surplus energy to the grid, demonstrating its environmental and economic benefits. Additionally, the findings of this study serve as a significant guideline for the design and implementation of solar energy projects in regions undergoing reconstruction following the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. The examination of renewable energy utilization through the Hatay case study suggests that similar analyses for other regions could contribute to sustainable reconstruction efforts and facilitate the adoption of comparable systems.

Keywords *Renewable Energy; Rooftop Solar Power Plant; Climate Change; PVsyst; Zero Emission.*

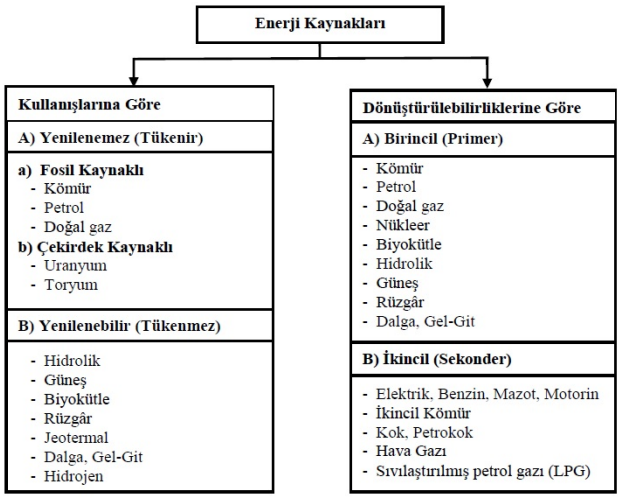
1. Giriş

İnsanların yaşamına ve dünya ekonomisine yön veren temel sektörler tarım, sanayi ve hizmet sektörleridir (Özsağır ve Akın 2012). Bu sektörlerin ve bağlı alt sektörlerin sürdürülebilirliği, şüphesiz ki ihtiyaç duydukları enerjinin kesintisiz bir şekilde temin edilmesiyle mümkündür (Pala 2018). 18. yüzyılda Sanayi Devrimi'nin gerçekleşmesiyle birlikte, teknolojinin hızla ilerlemesi ve insan nüfusunun artması, bu sektörlerin enerjiye olan talebini sürekli artırmıştır (Öztürk vd. 2023). Bu sektörlerin enerji ihtiyacının büyük bir bölümü, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kaynaklı enerji türlerinin elektrik, mazot, benzin ve LPG gibi enerji kaynaklarına dönüştürülmesiyle karşılanmaktadır. Enerji, dönüşüm süreçleri bağlamında birincil ve ikincil enerji olarak; kullanım yöntemlerine göre ise yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları şeklinde sınıflandırılmaktadır (Koç ve Kaya 2015). Şekil 1'de enerji kaynaklarının sınıflandırılması gösterilmektedir.

Yenilenemez enerji kaynaklarının dönüşüm süreçleri sonucunda çeşitli türlerde atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu

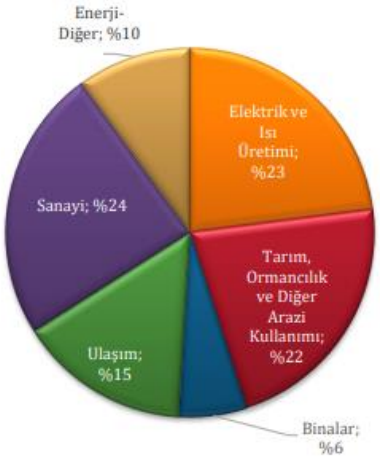
*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İsa KAMACI e-posta/e-mail: ikamaci@mku.edu.tr

atıklar çevre kirliliğine yol açmakta, dönüşüm sırasında atmosfere yayılan sera gazları ise sıcaklık tutucu özelliklerinden dolayı küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunlarının başlıca nedenlerinden biri olmaktadır (Erdoğan 2020).



Şekil 1. Enerji Kaynaklarının sınıflandırılması (Koç ve Kaya 2015)

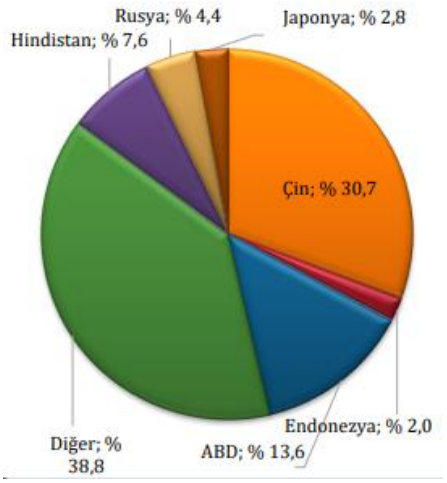
Sera gazları içerisinde en yüksek pay karbon emisyonlarına aittir (Kılınç ve Altıparmak 2020). Küresel sera gazı salımının %33'lük kısmı enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Bunun içinde elektrik ve ısı enerjisi üretiminin payı ise %23'tür (EÜAŞ 2023). Şekil 2'de ekonomik faaliyet alanlarına göre küresel sera gazı emisyonları gösterilmektedir.



Şekil 2. Ekonomik faaliyet alanlarına göre küresel sera gazı emisyonları (EÜAŞ 2023)

Ülkeler, fosil kaynaklı yakıtlardan kaynaklanan küresel ısınmayı önleme ve ekonomik büyümelerini sürdürebilme amacıyla ekonomik büyüme-karbon salımı ilişkisi üzerine politikalar geliştirmektedir (Cesur Durmaz ve Üçgül 2024).

Şekil 3'te, 2022 yılı sonu itibarıyla fosil yakıtlar kaynaklı karbon emisyonları gösterilmektedir. Ülkemiz, 436 $MtCO_2$ değerine ulaşarak dünyada 14. sırada yer almaktadır (EÜAŞ 2023).



Şekil 3. Fosil yakıtlar kaynaklı karbon emisyonu (EÜAŞ 2023)

Birleşmiş Milletler, karbon emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliği ile mücadele amacıyla 1985 yılında "Ozon Tabakasının Korunmasına Dair Viyana Sözleşmesi"ni kabul ederek bu alanda ilk adımını atmıştır. Bu sözleşmenin ardından, 1994 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) yürürlüğe girmiş ve iklim değişikliği ile mücadele daha güçlü bir zemine oturmuştur. Kyoto Protokolü (2020 yılına kadar) ve Paris Anlaşması (2020 yılından sonra) gibi ek anlaşmalar, karbon emisyonlarının sınırlanması amacıyla bu çerçeveyi desteklemiştir. Paris Anlaşması, Birleşmiş Milletler'in iklim değişikliği konusundaki en kapsamlı anlaşması olup, Türkiye'nin de aralarında bulunduğu 196 ülke ve Avrupa Birliği tarafından imzalanmıştır (Karakaya 2016, Birpınar 2022). Ekonomik büyümenin sürdürülebilir olması için karbon emisyonunun azaltılması gerektiği ve bu azaltımın da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla mümkün olacağı belirlenmiştir (Batmaz vd. 2019).

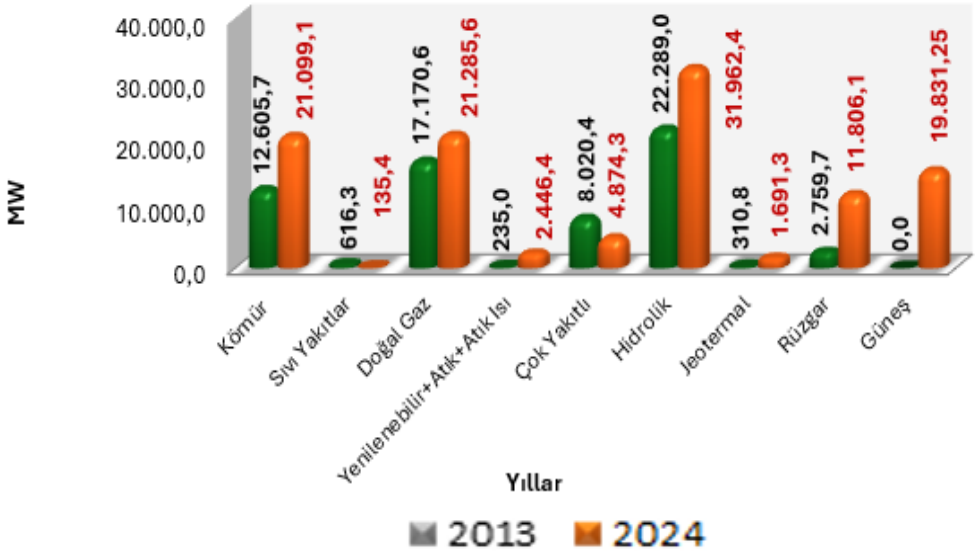
Ülkemizde, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında 2011-2023 yıllarını kapsayan İklim Değişikliği Uyum Eylem Planı hayata geçirilmiş olup, alınan kararlar ve sağlanan destekler neticesinde enerji sektöründe güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmıştır (Gürtepe ve Birpınar 2023). 2024 yılı sonu itibarıyla üretilen elektrik enerjisinin %53,59'u fosil kaynaklı yakıtlarla karşılanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik enerjisi üretim oranı ise %46,41'dir (İnt.Kay.1). 2024 yılında güneş enerjisinden üretilen elektrik enerjisi 23.579.425,696 MWh olarak kaydedilmiştir (İnt.Kay. 2).

Güneş enerjisinin kullanımına ilişkin teşvikler ve artan farkındalık, güneş enerji santrallerinin kurulumu sırasında maliyetlerin düşmesini sağlamış ve yeşil dönüşümü daha ulaşılabilir hale getirmiştir (Akarslan ve Hocaoğlu 2018).

Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği (2019) ile ülkemizde güneş enerjisi kaynaklı elektrik

enerjisi üretimi teşvik edilmeye devam etmektedir. Mesken aboneleri, 25 kW'a kadar olan güçle elektrik enerjisi üretebilmektedir. Yönetmelikte tanımlanan elektrik tüketimi yüksek olan aboneler ise, bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücünün iki katına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisanssız üretim tesisi kurarak elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilmekte ve ihtiyaç fazlası elektrik enerjisini şebekeye verebilmektedir (Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, 2019). Bu düzenlemeyle, lisanssız üretimin tüketime özgülenmiş üretim haline gelmesi amaçlanmaktadır. Lisanssız üretimin tüketime özgülenmesi modeli, ülkemizin 2053 net sıfır emisyon politikasında güneş enerjisinin potansiyelini ortaya koymaktadır.

2022 yılında gerçekleştirilen İklim Şurası'nda, enerji sektörü için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi ve daha fazla yenilenebilir enerji kapasitesinin enerji sistemine entegrasyonu adına sistem esnekliğinin artırılması gerektiği yönünde karar alınmıştır (Hamza Çelikyay ve Küçük Bayraktar 2023, İnt. Kyn. 3). Güneş enerji sistemleri, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla kurulum ve kullanım kolaylığı sunmaktadır. Gelişen teknoloji ve iyi işletilen teşvik mekanizmaları sayesinde kurulum maliyetlerinin düşmesi, güneş enerji sistemlerini daha cazip ve erişilebilir hale getirmiştir. Şekil 4'te yer verilen 2013-2024 yılları arasında güneş enerjisinin ülkemizdeki kurulu güce oranı ve 2024 Aralık ayı itibarıyla hizmette olan 31.491 adet güneş enerji santrali (lisanssız santraller dahil) bu durumu kanıtlar niteliktedir (TEİAŞ 2023, İnt. Kyn. 4).



Şekil 4. Birincil enerji kaynaklarına göre 2013-2024 yılları arası Türkiye kurulu gücü (TEİAŞ, 2023, İnt. Kyn. 4)

.

Bir güneş enerji santrali kurulumu, sürdürülebilir bir geleceğe yönelik uzun vadeli bir yatırımdır (Akcan vd. 2020). Ancak, bu yatırımdan en yüksek verimi alabilmek için dikkat edilmesi gereken birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler arasında coğrafi konum, iklim koşulları (güneşlenme süresi, iklim, rüzgâr hızı), kurulum alanının özellikleri, teşvik mekanizmaları ve kullanılacak fotovoltaik sistem ekipmanlarının seçimi yer almaktadır (Kırnapçı ve Pamuk 2024).

Bu parametreleri değerlendirerek kurulum hakkında ön bilgi sağlayabilen Pv*Sol, PVsyst, RETScreen, Homer gibi bilgisayar yazılımları mevcuttur. Bu yazılımlar sayesinde yapılan fizibilite çalışmaları, parametrelerin doğru bir şekilde uygulanmasıyla tasarlanan sistemin maliyet ve performans açısından en uygun hale gelmesini sağlamaktadır (Şahin 2024).

Literatürde, bu yazılımlar ile gerçekleştirilen güneş enerji sistemlerine dair birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar iki ana kategoriye ayrılabilir. İlk kategori, sistem tasarımını yaparak ekonomik ve çevresel analizler gerçekleştirir ve sistemin performansını değerlendirir. İkinci kategori ise faaliyette olan bir sistemi yeniden simüle ederek, üretim sonuçları ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırır.

(Martin 2024) çalışmasında, PV*Sol yazılımı kullanılarak bir meslek yüksekokulunun çatısına yönelik çatı üstü güneş enerji santrali tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım, 148,5 kW kurulu güce sahip olup, yıllık olarak 105.867 kg karbon emisyonunun önlenmesini ve 225.459 kWh elektrik enerjisinin üretilmesini sağlayacak şekilde simülasyon sonucu belirlenmiştir. Sistemin, yatırım maliyetini 7,2 yıl içinde geri ödeyeceği ifade edilmiş ve bu

projenin hem üniversite hem de çevre açısından faydalı olacağı vurgulanmıştır.

(Yalılı Kılıç ve Kurtaran 2024) çalışmalarında, PVsyst programı ile bir iş yerine çatı üstü güneş enerji santrali tasarımı yapmışlardır. Tasarım sonucunda, sistemin performansı %81,69 ve kayıplarının oranı %18,31 olarak hesaplanmıştır. 11,06 kWp kurulu güce sahip sistemin yıllık olarak 14.602,63 kWh elektrik enerjisi üretebileceği, firmanın yıllık enerji ihtiyacı olan 1.920 kWh'lik tüketimi düşüldüğünde şebekeye 13.714 kWh enerji verebileceği belirtilmiştir. Çalışmalarında, tasarımın yapıldığı bölgenin güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu için elverişli bir konumda olduğu ve bu bölgede bulunan diğer iş yerleri için de örnek teşkil edebileceğinden bahsedilmiştir. Ayrıca, tasarımın fosil kaynaklı elektrik enerjisine olan bağımlılığı azaltacağı vurgulanmıştır.

(Ismahane *et al.* 2023) çalışmasında, bir ilkokulda kullanılmak üzere PVsyst programı ile 20 adet 310 W'lık güneş paneli ve 6 kW'lık bir invertör kullanılarak, toplam yatırım tutarı 821.000 Cezayir dinarı olarak belirlenen ve ortalama geri ödeme süresi 8 yıl olan bir güneş enerji sistemi tasarımı yapılmıştır. İlkokul seçiminin, öğrencilerde yenilenebilir enerji konusunda farkındalık oluşturarak ülkenin geleceğini güvence altına almaya yardımcı olacağı belirtilmiştir. Çalışmalarında, devletlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapması durumunda petrol ve gaz yükünün azalacağı, elektrik sektöründe tasarruf sağlanacağı ve böylece dünya genelindeki diğer sanayileşmiş ülkelerle rekabet edilebileceği ifade edilmiştir.

(Çınaroğlu 2022) çalışmasında, şebekeden bağımsız 550 Wp kurulu güce sahip bir güneş enerji sistemini, 5 farklı takip sistemi (sabit, mevsimsel yatay ve dikey, çift eksen) ile PVsyst programının veri tabanını kullanarak maliyet ve performans açısından karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, çift eksen takipli güneş enerji sisteminin diğer takip sistemlerine göre en yüksek elektrik enerjisini (1.049,9 kWh) ürettiği ve 57,03 kWh ile en az elektrik enerji kaybına maruz kaldığını belirtmiştir. Sabit eksenli güneş enerji sisteminde ise 764,77 kWh ile en düşük elektrik enerjisinin üretildiği ve en fazla kayıp enerjinin 93,36 kWh olduğu ifade edilmiştir. Tasarladığı karşılaştırma sisteminde, kullanıcı ihtiyacı dışında oluşan fazla enerjinin de en yüksek miktarda çift eksen takipli güneş enerji sisteminde üretildiği, en düşük miktarda ise sabit eksenli güneş enerji sisteminde olduğu belirtilmiştir. Çalışmasında ayrıca şebekeye bağlı bir sistem tasarımı yapmış ve bu sistemin tekno-ekonomik değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Tasarlanan sistemin teknik analizinde yıllık 3,1 MWh elektrik enerjisi üretebileceği ve performans oranının %83,7 olduğu belirtilmiş, ekonomik analizinde ise yatırım maliyetinin yaklaşık 12.000 TL olduğu ve bu maliyetin 5 yıl içinde amorti edileceği vurgulanmıştır.

(Mishra *et al.* 2024) çalışmalarında, 5 MWp kapasiteli bir güneş paneli sisteminin güç üretimi analizini, PVsyst programı ile tasarım ve simülasyon yaparak gerçekleştirmişler ve sonrasında, simülasyonun tahmin ettiği performans ile aynı kapasiteye sahip gerçek bir güneş paneli sisteminin üretimini karşılaştırmışlardır. Analiz, gerçek ve simülasyon sonuçları arasındaki farklar incelenerek PVsyst programının güvenilirliği ve uygunluğu test edilmiştir. Ayrıca, IEC 61724 standardına göre temel performans göstergeleri de değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, tahmini ve gerçek sistem verimleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Gerçek sistemin performans oranı %81,02 olarak hesaplanırken, modellenen sistemin performans oranı %80,42 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, PVsyst programının çatı üstü güneş enerji sistemlerini değerlendirmek ve iyileştirmek için güvenilir bir araç olduğunu, ayrıca güneş enerjisi alanındaki çalışmalar için gerçek değerlere daha yakın bilgiler sunduğunu göstermektedir.

(Şahin 2024) çalışmasında, Kahramanmaraş ilinde 1.179 kWp kurulu güce sahip bir santralin 2023 yılı üretim verileri ile PVsyst programı ile yapılan simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır. 2023 yılında güneş enerji santrali 1.893.005 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. PVsyst programı ile yapılan simülasyon sonucunda ise 1.896.851 kWh elektrik enerjisi üretilebileceği tahmin edilmiştir. Çalışmada, bu iki veri arasındaki farkın 3.846 kWh olduğu belirlenmiştir. Bu farkın %0,203 olduğu ve bu küçük farkın, PVsyst programı ile simülasyon yapmanın güneş enerji sistemlerinin kurulmadan önce sayısal modellenmesinin önemini vurguladığı ifade edilmiştir.

(Sancar ve Altınkaynak 2021)'in çalışmalarında, farklı çatı tipleri (düz ve engebeli) ve eğim açıları (18°, 24°, 35°) dikkate alınarak toplamda 6 farklı senaryo incelenmiştir. Isparta'daki bir ev için 240 m² çatı alanına kurulacak 49,1 kW gücündeki şebeke bağlantılı fotovoltaik (PV) sistemlerin enerji üretim performansı PVsyst 7.2 simülasyon yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre en yüksek enerji üretimi 35° eğimli düz çatılarda, en düşük üretim ise engebeli çatılarda elde edilmiştir. Performans oranının düz çatılarda daha yüksek (%87,03), engebeli çatılarda ise daha düşük (%84,4) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gölgelenme ve sıcaklık kayıpları gibi parametreler değerlendirilmiş; düz çatılarda gölgelenme kaybı sıfır,

sıcaklık kaybı daha yüksek (%6,63) bulunmuştur. Çalışmalarında, çatı eğimi ve yöneliminin enerji üretimine etkisini vurgulayarak doğal soğutmayı destekleyecek çatı tasarımlarının önemini ortaya koymuşlardır.

(Sarı ve Özyiğit 2020)'in çalışmalarında, Sivas ilinin 5 ilçesinde, 10 MW gücünde monokristal ve polikristal panellerle güneş enerji santralleri tasarlanmış ve PVsyst programı ile analiz edilmiştir. Santrallerin kurulumu, banka kredisi kullanılmadan ve kredi alarak olmak üzere iki farklı senaryo ile değerlendirilmiştir. Polikristal panellerle kurulan santrallerin geri ödeme süreleri, monokristal panellere göre daha kısa bulunmuş, en kısa geri ödeme süresi 4,5 yıl ile Divriği ve Yıldızeli ilçelerinde gözlenmiştir. Monokristal panellerle kurulan santrallerin verimi daha yüksek olup, en yüksek performans oranı Merkez ve Yıldızeli ilçelerinde elde edilmiştir. En düşük birim maliyet, 0,04443 $/kWh ile Divriği ilçesinde polikristal panellerle kredi alınmadan kurulan santralde tespit edilmiştir. Güneş enerjisi potansiyeli ve enerji üretimi açısından Gürün ilçesi en yüksek elektrik üretimi sağlarken, Zara ilçesi en düşük üretimi göstermektedir. Ekonomik analizde, monokristal paneller için en fazla kâr Divriği ilçesinde, polikristal paneller için ise Yıldızeli ilçesinde elde edilmiştir. Çalışma, Sivas ilindeki diğer ilçelerde de benzer çalışmalar yapılarak güneş enerjisi yatırımlarının arttırılabileceğini ve enerji iletim maliyetlerinin de göz önünde bulundurulmasının faydalı olacağını vurgulamaktadır.

(Çiftçi *et al*. 2020) çalışmalarında, Mardin iline bağlı bir eğitim kurumunun çatısına şebekeye bağlı 9,9 kWp güce sahip bir güneş enerji sistemi tasarlamış ve bu sistemin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, sistemin yıllık 13,3 MWh elektrik enerjisi üretebileceği tahmin edilmiş ve bu üretimin %28,6'sının kurumun enerji tüketimini karşılayabileceği, yıllık 6,7 MWh'lik fazla enerjinin ise şebekeye aktarılacağı belirtilmiştir. Çalışmada, sistemin ilk yatırım maliyetlerinin geri dönüşü göz önünde bulundurularak bu tür sistemlerin diğer okullarda da uygulanabilirliğinin mümkün olduğu vurgulanmıştır.

(Bulut vd. 2018) çalışmalarında, Türkiye'de güneş enerjisi kullanım alanları ile Siirt ilinin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmişlerdir. Güneş enerjisinin kullanımının artmasına yönelik politikaların ve sunulan teşviklerin çeşitlendirilmesiyle elektrik enerjisine ulaşımın olmadığı alanlarda elektrik enerjisine erişimin sağlanacağını belirtmişlerdir.

Bu çalışma, güneş enerji sistemlerinin tasarım ve değerlendirme süreçlerine bölgesel bir perspektifle katkı sağlamayı amaçlayan özgün bir araştırma olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Hatay ilinin coğrafi ve iklimsel koşullarına özgü bir enerji modelinin geliştirilmesi, bu çalışmayı mevcut literatürdeki genel enerji sistemleri çalışmalarından ayırmaktadır. Çalışma, PVsyst 7.4.5 yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyon analizleri ve detaylı ekonomik değerlendirmeleri birleştirerek, bölgeye yönelik uygulanabilir bir yol haritası sunmaktadır.

Çalışmamız, yenilenebilir enerji kaynaklarının en üst düzeyde kullanılması ve kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi amacıyla Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Kırıkhan Meslek Yüksekokulu'na çatı tipi güneş enerji santrali kurulumunun modellemesini yaparak, kurumun güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim potansiyelini ortaya çıkarmayı hedeflemektedir. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığının 2023 Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu'nda belirtilen "2053 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için önemli miktarda yeni güneş ve rüzgâr enerjisi kapasitesine ihtiyaç olduğu" ve bu doğrultuda 11 ile verilecek özel teşviklerle güneş ve rüzgâr enerjisi yatırımlarının bu illere yönlendirilebileceği vurgusu dikkate alınarak, çalışmamız bölgenin kalkınmasına ve ülkemizin 2053 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşmasına katkı sağlayacaktır. Literatürdeki pek çok araştırma, ya genel enerji sistemlerinin performansına odaklanmakta ya da belirli bir sistemin tek bir yönünü (örneğin çevresel etkiler veya ekonomik fizibilite) ele almaktadır. Ancak, bu çalışmada performans oranı, karbon emisyon azaltımı ve ekonomik kazanç gibi farklı parametreler bir arada incelenmiş; bu sayede kapsamlı bir analiz ortaya konmuştur.

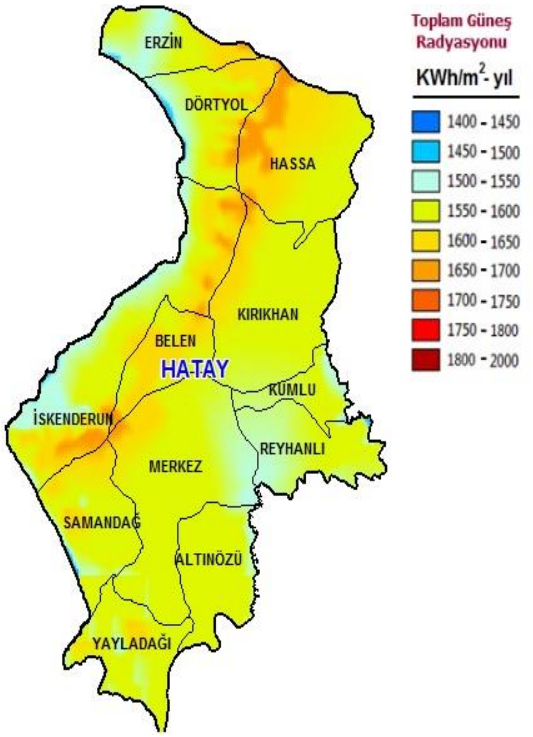
Çalışmanın bir diğer önemli katkısı, Hatay gibi yeniden yapılandırma sürecinde olan bir bölgeye özgü bir enerji çözümü sunmasıdır. Deprem sonrası enerji altyapısının sürdürülebilir bir şekilde inşa edilmesine yönelik bir model niteliği taşımaktadır. Bu çalışmanın literatüre sağladığı en önemli katkılardan biri, güneş enerji sistemlerinin bölgesel ihtiyaçları karşılama kapasitesini, ekonomik geri dönüşlerini ve çevresel faydalarını eş zamanlı olarak analiz etmesidir. Özellikle Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda, yenilenebilir enerji projelerinin yerel ölçekteki uygulanabilirliğini detaylandıran nadir çalışmalardan biri olarak literatürdeki boşluğu doldurmaktadır. Sonuç olarak, bu araştırma, Hatay özelinde geliştirilen model ile hem yerel yönetimler hem de enerji planlamacıları için önemli bir referans kaynağı olmayı hedeflemektedir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca bölgesel değil, aynı zamanda küresel ölçekte sürdürülebilir enerji literatürüne de değerli bir katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

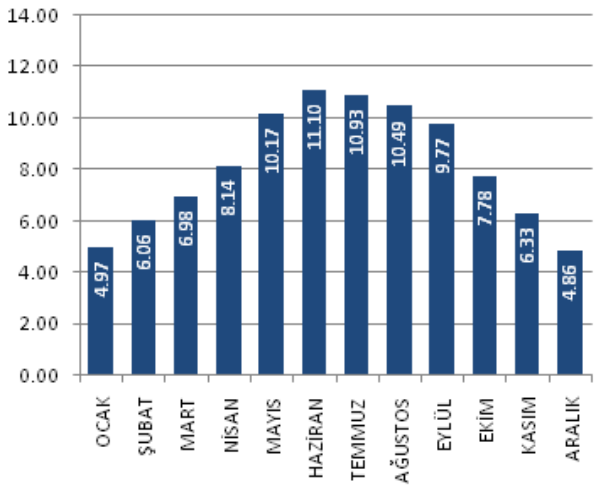
Çalışma, PVsyst programının 7.4.5 sürümü ile yapılmış olup, çatı güneş enerji sistemi tasarımı Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Kırıkhan Meslek Yüksekokulu binası için gerçekleştirilmiştir.

2.1 Hatay İli İklimsel Verileri

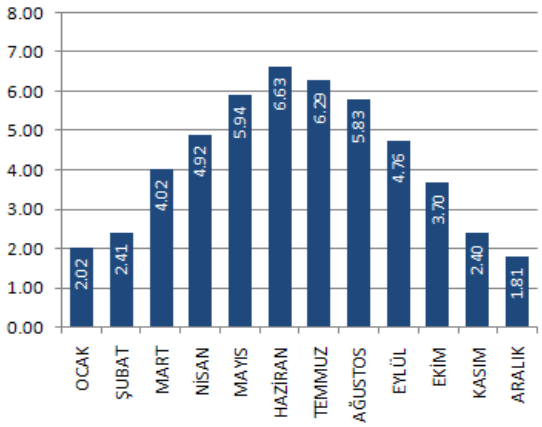
Hatay ili, diğer illere göre güneşlenme süresi ve ışınım miktarı baz alındığında ortalamanın üzerinde bir değere sahip olmakla birlikte, güneş radyasyon miktarı 1450-1750 kWh/m²-yıl'dır. Şekil 5'te, Hatay ili güneş radyasyonu haritası gösterilmiştir. Bina Kırıkhan ilçesinde bulunduğu için, Kırıkhan ilçesinin güneşlenme süreleri ve güneş global radyasyon değerleri, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Hatay ili güneş radyasyonu haritası (İnt. Kyn. 5).

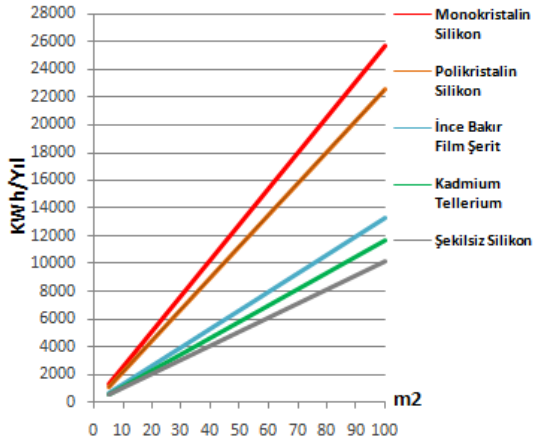


Şekil 6. Kırıkhan ilçesi güneşlenme süreleri (Saat) (İnt. Kyn. 5).



Şekil 7. Kırıkhan ilçesi Global Radyasyon Değerleri (kWh/m²-Gün) (İnt. Kay. 5).

Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün hazırlamış olduğu Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası'nda, fotovoltaik panel çeşitlerine göre üretilebilecek enerji miktarı bilgilerine yer verilmiş olup Kırıkhan ilçesi için en uygun olan panel çeşidinin monokristal silikon panel olduğu değerlendirilmiştir. Kırıkhan ilçesi için fotovoltaik panel tiplerine göre, metrekare başına üretilebilecek enerji, Şekil 8'de kWh/yıl cinsinden verilmiştir.



Şekil 8. Kırıkhan ilçesi Fotovoltaik Panel Tipi-Alan üretilebilecek enerji (kWh-yıl) (İnt. Kay. 5).

2.2 Binanın Fiziki Bilgileri ve Enerji Tüketim Verileri

Tasarımın yapılacağı bina, Kırıkhan Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü'ne ait, 2537 m² çatı alanına sahip, birbirine bitişik 3 bloktan oluşan bir kamu kurumu binasıdır. Binanın çatı yüksekliği 13,5 metredir. Bina çatısına tasarlanan sistem, doğal gölgelenme etkisi altında olmayacaktır. Ancak binaya ait iklimlendirme sistemi dış üniteleri ve bina blok havalandırma bacaları, sistemde gölge etkisi yaratacaktır.

Binanın enerji tüketim verileri, 2022 yılı baz alınarak hesaplanmıştır. 2021 yılında yaşanan pandemi, 2023 yılında yaşanan deprem ve alınan uzaktan eğitim kararı 2024 yılında da devam ettiğinden, binanın tam kapasite ile enerji tükettiği yıl 2022 yılıdır. Bu kapsamda elektrik enerjisi tüketim verileri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Şekil 9. Kırıkhan Meslek Yüksekokulu uydu görüntüsü (İnt.Kay. 6).

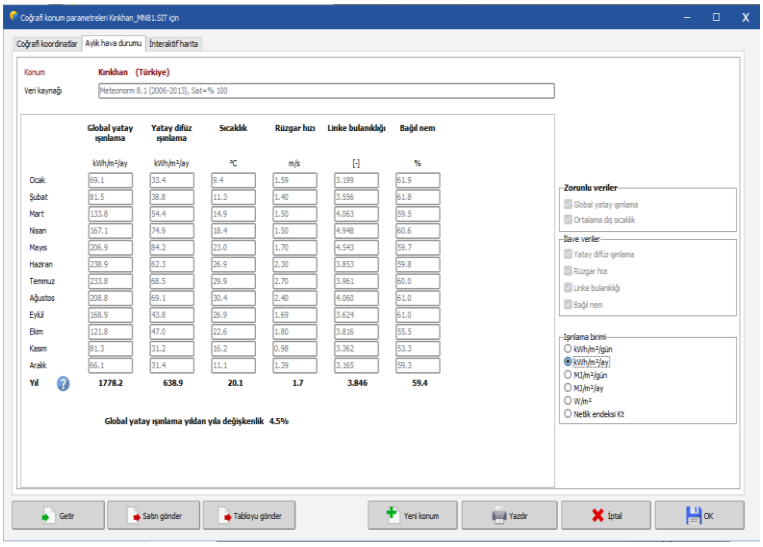
2.3 Sistemin Tasarlanması

Güneş enerji santrali, üretilen ihtiyaç fazlası enerjinin şebekeye verilerek satışının yapılması düşünülerek şebekeye bağlı tip olarak belirlenmiş ve seçimi PVsyst programının arayüzü üzerinden yapılmıştır. Sistemde kullanılan hava durumu verileri, Meteonorm 8.1, NASA-SSE, PVGIS gibi veri tabanları arasından interaktif harita arayüzü kullanılarak konum seçimi yapılması ve Meteonorm 8.1 veri tabanından faydalanılması suretiyle sentetik olarak üretilmiştir.

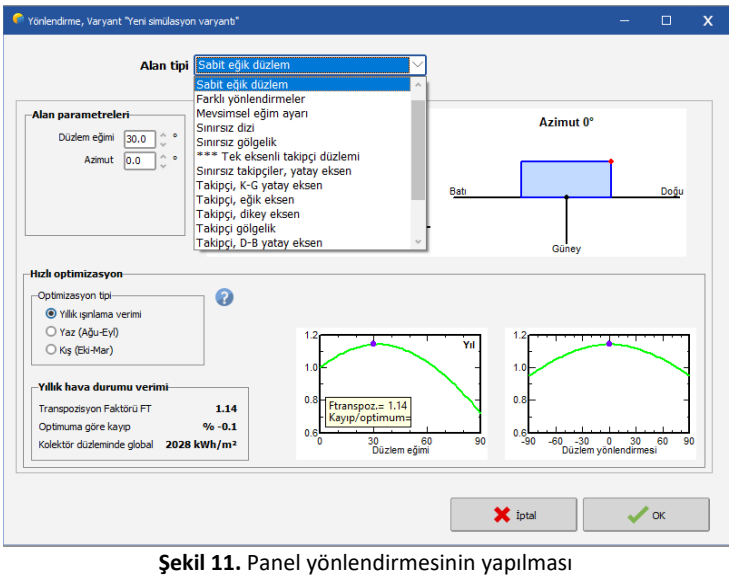
Çizelge 1. 2022 yılı elektrik tüketim verileri

2022 Yılı	Aylık (kWh)	Günlük (kWh)
Ocak	36906,66	1191
Şubat	24856,02	888
Mart	32751,18	1056
Nisan	13951,98	465
Mayıs	12453,84	402
Haziran	15062,04	502
Temmuz	10788,12	348
Ağustos	12380,76	399
Eylül	17152,38	572
Ekim	18062,1	583
Kasım	18809,28	627
Aralık	28410,48	917
TOPLAM	**241584,84**	

Hava durumu verileri oluşturulduktan sonra, sistemin ana parametrelerinden biri olan güneş panellerinin, program arayüzündeki ana parametreler kısmından yönlendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 10. Sentetik olarak oluşturulan aylık hava durum verileri



Şekil 11. Panel yönlendirmesinin yapılması

Sistem yönlendirmesi tamamlandıktan sonra, güneş enerji sisteminde kullanılacak olan panel ve invertörlerin seçimi ana parametreler kısmından yapılmıştır. Sistemde kullanılan güneş panelleri monokristal tip olarak seçilmiştir. PVsyst programının veri tabanında bulunan ve yerli üretim olan CW Enerji M12 670 Wp güce sahip Half-Cut Multi Busbar paneller, yüksek dönüşüm verimliliği, kendi kendini temizleyen ve yansımayı azaltan cam, düşük ışınımda yüksek verimlilik sunması sebebiyle tercih edilmiştir. Çizelge 2'de bir adet güneş panelinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. Güneş panelinin elektriksel ve mekanik özellikleri

CW Enerji-CWT670-132PM12 670 Wp	
Elektriksel Özellikler	
Maksimum Güç (Pmax)	670 Wp
Modül Verimi (%)	21.57
Kısa Devre Akımı (Isc)	18.51
Maksimum Güç Gerilimi (Vmp)	38.30
Maksimum Güç Akımı (Imp)	17.50
Açık Devre Gerilimi (Voc)	46.00
Kısa Devre Akımı (Isc)	18.51
Mekanik Özellikler	
Hücre Boyutu(mm)	210x105
Ağırlık(kg)	34.5
Panel Boyutu(mm)	2384x1303x35
Hücre Sayısı(adet)	132 (6x22)

Sistemin tasarımı gerçek ölçülerine uygun şekilde modellenen binanın çatısına panellerin optimum seviyede yerleştirilmesi suretiyle yapılmış, 323 adet güneş paneli kullanılmış ve 216 kWp değerinde kurulu güç elde edilmiştir. Sistem tasarımında 100 kW güce sahip 2 adet Huawei sun2000-100ktl-m1 inverter seçimi yapılmıştır. Çizelge 3'te invertöre ait teknik özellikler verilmiştir.

Panel ve invertör seçim işleminden sonra sisteme ait kayıplar, ana parametreler kısmından tanımlanmıştır. Binaya ait 2022 yılı elektrik enerjisi tüketim verileri ana parametreler kısmındaki öz tüketim butonu aracılığıyla programa entegre edilmiştir.

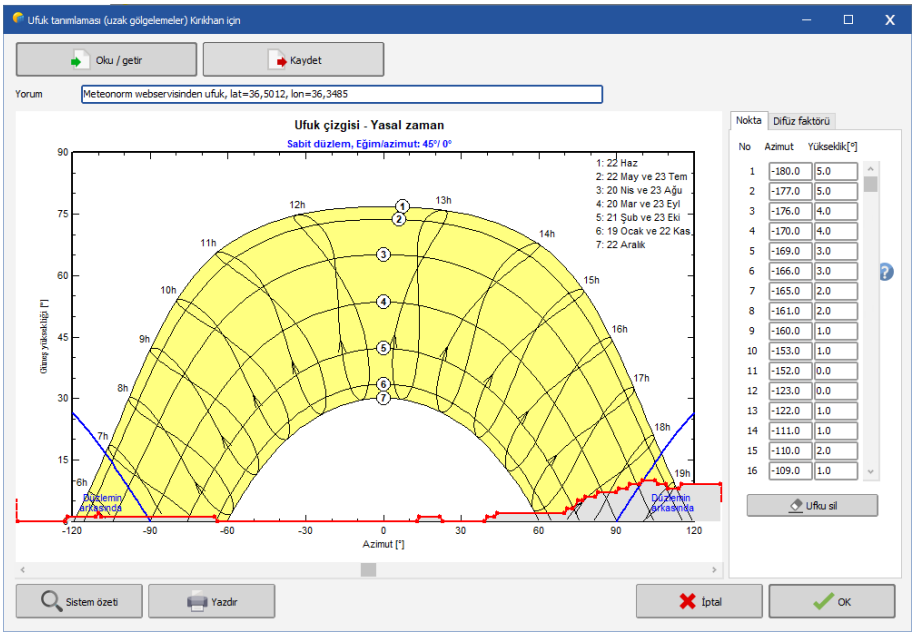
Ufuk tanımlaması butonu ile Meteonorm web servisinden konuma ait panel eğim açıları ve azimut değerlerine göre ufuk tanımlaması elde edilmiştir. Bu tanımlama, sistemiin güneşin hareketine göre daha doğru ve gerçeğe yakın değerler elde etmesine yardımcı olur.

Tasarlanan güneş enerji sistemi, binanın çatısında doğal gölgelenme etkisine maruz kalmamaktadır. Ancak, binanın iklimlendirme sisteminin dış üniteleri ve havalandırma bacaları, sistemde gölge etkisi oluşturacaktır. Bu gölgelenme etkisi, binanın 3 boyutlu görseli hazırlanarak ve yakın gölgelenmeler butonu aracılığıyla sisteme entegre edilmiştir. Bu işlem, ilgili alanın ölçümleri alınarak gerçekleştirilmiştir.

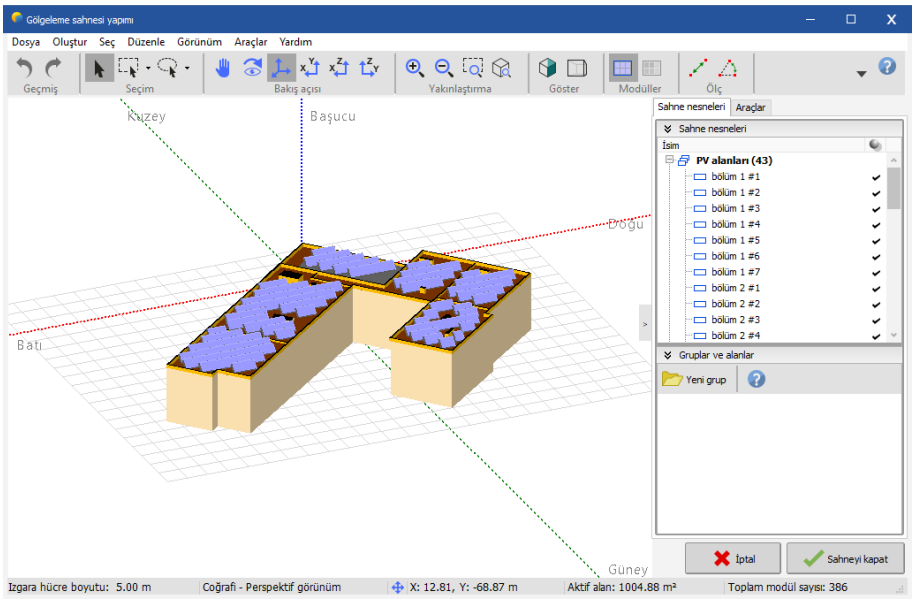
Çizelge 3. İnvertör özellikleri

Huawei sun2000-100ktl-m1	
Teknik Özellikler	
Maks. Verimlilik	%98,8 @480 V
	Giriş
Maks. Giriş Gerilimi	1.100 V
MPPT Başına Maks. Giriş Akımı	26 A
MPPT Başına Maks. Kısa Devre Akım	40 A
Başlangıç Gerilimi	200 V
MPPT Çalışma Gerilimi Aralığı 2	200 V ~ 1.000 V
Nominal Giriş Gerilimi	720 V @480 Vac, 600 V @400 Vac, 570 V @380 Vac
MPPT Adedi	10
	Çıkış
Nominal AC Aktif Güç	100.000 W
Maks. AC Görünür Güç	110.000 VA
Maks. AC Aktif Güç (cosϕ=1)	110.000 W
Nominal Çıkış Gerilimi	480 V/ 400 V/ 380 V, 3W+(N)+PE
Nominal AC Şebeke Gerilimi	50 Hz / 60 Hz
Nominal Çıkış Akımı	120,3 A @480 V, 144,4 A @400 V, 152,0 A @380 V
Maks. Çıkış Akımı	133,7 A @480 V, 160,4 A @400 V, 168,8 A @380 V
	Genel Bilgiler
Boyutlar (E x Y x D)	1,035 x 700 x 365 mm
Ağırlık (Askı aparatı ile)	90 kg
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-25°C ~ 60°C
Soğutma	Akıllı Havalı Soğutma

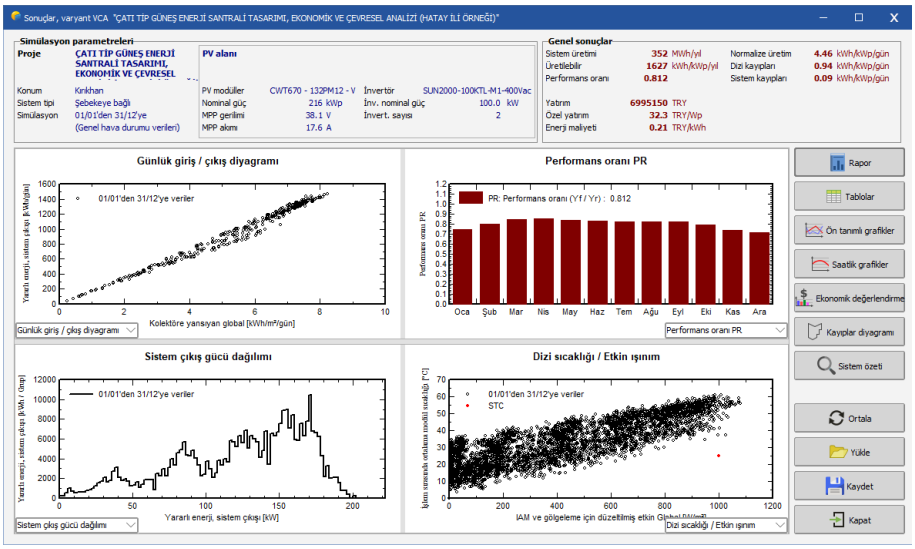
Sistemin PVsyst içerisinde tanımlamaları yapıldıktan sonra simülasyon aşamasına geçilmiştir. Simülasyon kısmında, 'Simülasyonu Yürüt' butonuyla simülasyon başlatılmakta ve ardından sistemin raporunun alınabildiği, ekonomik değerlendirmenin yapılabildiği arayüz ekranı görüntülenmektedir.



Şekil 12. Ufuk tanımlaması



Şekil 13. Üç boyutlu gölgeleme sahnesi

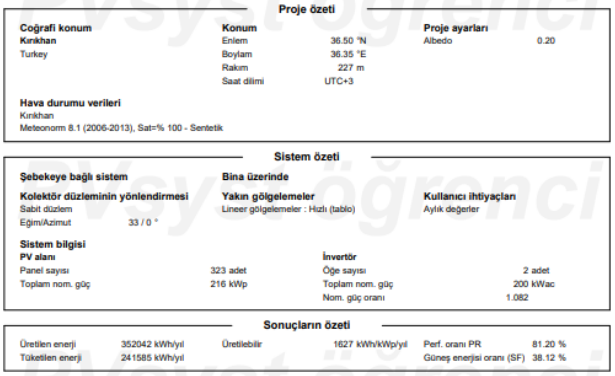


Şekil 14. Sistem raporunun alındığı arayüz

3. Bulgular

Çalışmanın yapıldığı konum Hatay ili olup, tasarımın gerçekleştirildiği konuma ait hava durumu verileri ve güneş ışınım verileri, Meteonorm veri tabanı kullanılarak sentetik olarak oluşturulmuştur. Bu veriler ışığında, sistemin panel eğim açısı 33° olarak belirlenmiş ve gerçekleştirilen simülasyon sonucunda yıllık üretilen enerji 352 MWh, performans oranı ise %81,2 olarak bulunmuştur. Tasarıma ait proje özet bilgileri Şekil 15'te sunulmuştur. Tasarımda kullanılmış olan fotovoltaik güneş panellerinin ve invertörlerin teknik bilgileri ile kolektör alanı özellikleri Şekil 16'da sunulmuştur. Sistemin normalize üretimi, performans oranı ve bilançosunun belirtildiği genel sonuçlar, Şekil 17'de gösterilmektedir.

Tasarımın ışınım kayıpları, dizi kayıpları ve sistem kayıplarını detaylandıran kayıplar diyagramına Şekil 18'de yer verilmiştir.



Proje özeti

Coğrafi konum
Kırıkhan
Turkey

Konum

Enlem	36.50 °N
Boylam	36.35 °E
Rakım	227 m
Saat dilimi	UTC+3

Proje ayarları
Albedo 0.20

Hava durumu verileri
Kırıkhan
Meteonorm 8.1 (2006-2013), Sat=% 100 - Sentetik

Sistem özeti

Şebekeye bağlı sistem
Bina üzerinde

Kolektör düzleminin yönlendirmesi
Sabit düzlem
Eğim/Azimut 33 / 0 °

Yakın gölgelemeler
Lineer gölgelemeler : Hızlı (tablo)

Kullanıcı ihtiyaçları
Aylık değerler

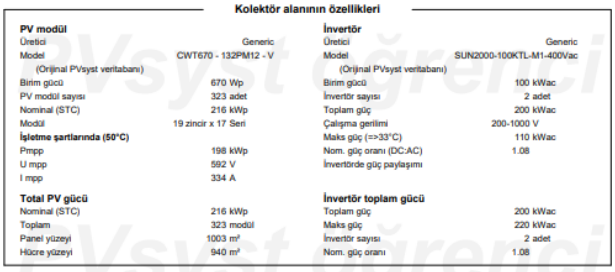
Sistem bilgisi

PV alanı		İnvertör	
Panel sayısı	323 adet	Öğe sayısı	2 adet
Toplam nom. güç	216 kWp	Toplam nom. güç	200 kWac
		Nom. güç oranı	1.082

Sonuçların özeti

Üretilen enerji	352042 kWh/yıl	Üretilebilir	1627 kWh/kWp/yıl	Perf. oranı PR	81.20 %
Tüketilen enerji	241585 kWh/yıl			Güneş enerjisi oranı (SF)	38.12 %

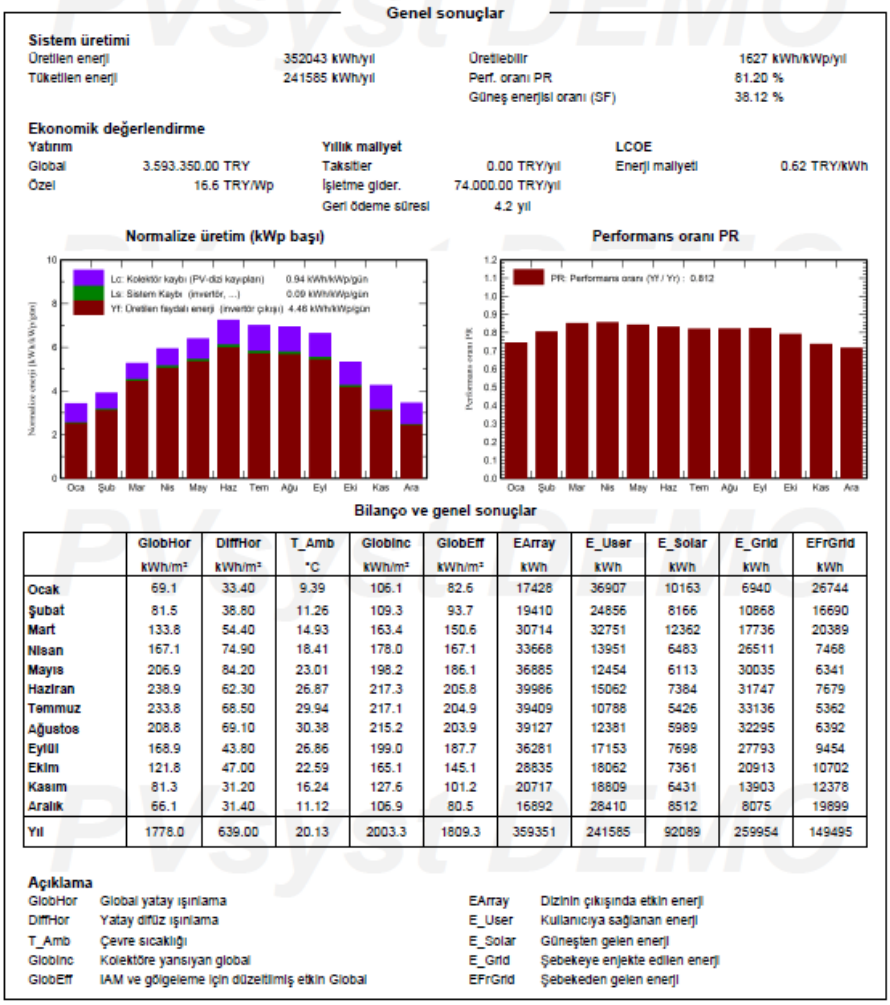
Şekil 15. Proje özet verileri



Kolektör alanının özellikleri

PV modül		İnvertör	
Üretici	Generic	Üretici	Generic
Model	CWT670 - 132PM12 - V	Model	SUN2000-100KTL-M1-400Vac
(Orijinal PVsyst veritabanı)		(Orijinal PVsyst veritabanı)	
Birim gücü	670 Wp	Birim gücü	100 kWac
PV modül sayısı	323 adet	İnvertör sayısı	2 adet
Nominal (STC)	216 kWp	Toplam güç	200 kWac
Modül	19 zincir x 17 Seri	Çalışma gerilimi	200-1000 V
İşletme şartlarında (50°C)		Maks güç (=>33°C)	110 kWac
Pmpp	198 kWp	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.08
U mpp	592 V	İnvertörde güç paylaşımı	
I mpp	334 A		
Total PV gücü		**İnvertör toplam gücü**	
Nominal (STC)	216 kWp	Toplam güç	200 kWac
Toplam	323 modül	Maks güç	220 kWac
Panel yüzeyi	1003 m²	İnvertör sayısı	2 adet
Hücre yüzeyi	940 m²	Nom. güç oranı	1.08

Şekil 16. Kolektör alanı özellikleri



Genel sonuçlar

Sistem üretimi

Üretilen enerji	352043 kWh/yıl	Üretilebilir	1627 kWh/kWp/yıl
Tüketilen enerji	241585 kWh/yıl	Perf. oranı PR	81.20 %
		Güneş enerjisi oranı (SF)	38.12 %

Ekonomik değerlendirme

Yatırım		Yıllık maliyet		LCOE	
Global	3.593.350.00 TRY	Taksitler	0.00 TRY/yıl	Enerji maliyeti	0.62 TRY/kWh
Özel	16.6 TRY/Wp	İşletme gider.	74.000.00 TRY/yıl		
		Geri ödeme süresi	4.2 yıl		

Normalize üretim (kWp başı)

Performans oranı PR

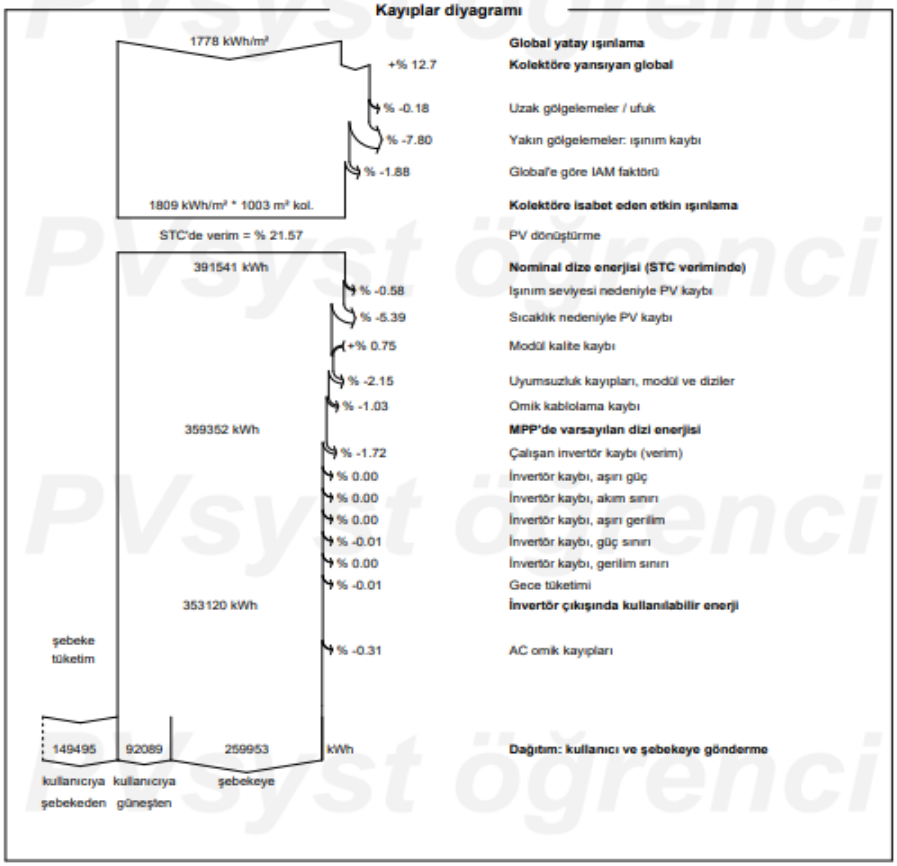
Bilanço ve genel sonuçlar

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_User kWh	E_Solar kWh	E_Grid kWh	EFrGrid kWh
Ocak	69.1	33.40	9.39	106.1	82.6	17428	36907	10163	6940	26744
Şubat	81.5	38.80	11.26	109.3	93.7	19410	24856	8166	10868	16690
Mart	133.8	54.40	14.93	163.4	150.6	30714	32751	12362	17736	20389
Nisan	167.1	74.90	18.41	178.0	167.1	33668	13951	6483	26511	7468
Mayıs	206.9	84.20	23.01	198.2	186.1	36885	12454	6113	30035	6341
Haziran	238.9	62.30	26.87	217.3	205.8	39986	15062	7384	31747	7679
Temmuz	233.8	68.50	29.94	217.1	204.9	39409	10788	5426	33136	5362
Ağustos	208.8	69.10	30.38	215.2	203.9	39127	12381	5989	32295	6392
Eylül	168.9	43.80	26.86	199.0	187.7	36281	17153	7698	27793	9454
Ekim	121.8	47.00	22.59	165.1	145.1	28835	18062	7361	20913	10702
Kasım	81.3	31.20	16.24	127.6	101.2	20717	18809	6431	13903	12378
Aralık	66.1	31.40	11.12	106.9	80.5	16892	28410	8512	8075	19899
Yıl	1778.0	639.00	20.13	2003.3	1809.3	359351	241585	92089	259954	149495

Açıklama

GlobHor	Global yatay ışınlama	EArray	Dizinin çıkışında etkin enerji
DiffHor	Yatay difüz ışınlama	E_User	Kullanıcıya sağlanan enerji
T_Amb	Çevre sıcaklığı	E_Solar	Güneşten gelen enerji
GlobInc	Kolektöre yansıyan global	E_Grid	Şebekeye enjekte edilen enerji
GlobEff	IAM ve gölgeleme için düzeltilmiş etkin Global	EFrGrid	Şebekeden gelen enerji

Şekil 17. Tasarıma ilişkin genel sonuçlar



Şekil 18. Kayıplar diyagramı

3.1 Ekonomik Analiz

Bir güneş enerji santralinin ekonomik olarak analizi ve yatırım kararının alınabilmesi için statik (paranın zaman değerini dikkate almayan) veya dinamik (paranın zaman değerini dikkate alan) yöntemler kullanılabilmektedir (Yalılı 2021). Tasarlanan sistemin ekonomik analizinde statik yöntemlerden geri ödeme süresi (GÖS) yöntemi kullanılmıştır. Tasarlanan sistemin geri ödeme süresi ilk yatırım tutarının yıllık toplam net kârlarının eşitlendiği ve net kâr elde etmeye başlanılan yıl olarak (1) numaralı formül ile hesaplanır (Yıldırım ve Aksu 2021).

$$GÖS = \frac{Yatırım\ Tutarı}{Yıllık\ Ortalama\ Net\ Kâr} \quad (1)$$

Sistemde dinamik değerlendirme yöntemlerinden net bugünkü değer (NBD) yöntemi kullanılmıştır. Net bugünkü değer yöntemi, bir yatırımın ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı nakit girişlerinin, belirlenen iskonto oranı (beklenen asgari getiri oranı) kullanılarak bugünkü değerine dönüştürülmüş toplamı ile yatırım için yapılan nakit çıkışlarının aynı iskonto oranıyla bugüne indirgenmiş toplamı arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu yöntem, bir yatırımın maliyetine kıyasla yaratacağı değeri ölçmek için (2) numaralı formül ile ifade edilir (Gündüz 2019).

$$NBD = \left[\sum_{t=0}^{n} \frac{A}{(1+r)^t}\right] - C \quad (2)$$

Bu formülde geçen, "*t*" yatırımın süresi içindeki takvim yılını, "*n*" yatırım ömrünü, "*A*" yatırımdan sağlanacak net nakit akışlarını, "*r*" iskonto oranını, "*C*" başlangıçtaki yatırım miktarını ifade etmektedir.

Sistemde dinamik değerlendirme yöntemlerinden olan İç Kârlılık Oranı (İKO) yöntemi kullanılmıştır. İç kârlılık oranı yöntemi, net bugünkü değer yöntemine oldukça benzerdir; aralarındaki temel fark, iskonto oranının ele alınış biçimidir. İç kârlılık oranı, bir projenin nakit giriş ve çıkışlarını dengeleyen iskonto oranı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, bu yöntem, bir yatırım projesi boyunca elde edilen toplam nakit girişlerinin bugünkü değerini, aynı dönemde gerçekleşen nakit çıkışlarının bugünkü değerine eşitleyen iskonto oranını belirlemeyi amaçlar. Bu oran, net bugünkü değerin sıfır olduğu noktayı ifade eder ve (3) numaralı formül ile ifade edilir (Aytekin 2005).

$$İKO = \left[\sum_{t=0}^{n} \frac{A}{(1+r)^t}\right] - C = 0 \quad (3)$$

Sistemin ekonomik analizinde kullanılan bir diğer yöntem de yatırımın geri dönüşü (ROI) parametresidir. Bir yatırımın getirisi ile maliyeti arasındaki ilişkiyi yüzdesel olarak ifade etmekte olup (4) numaralı formül ile ifade edilir.

$$ROI = \frac{Yatırım\ Getirisi - Yatırım\ Maliyeti}{Yatırım\ Maliyeti} x100 \quad (4)$$

Sistemde kullanılan ekipmanlara ve kurulum maliyetlerine ilişkin varsayımlar Çizelge 4'teki belirtilen oranlarda kabul edilmiştir (İnt. Kyn. 7).

Çizelge 4. Kurulum maliyetleri

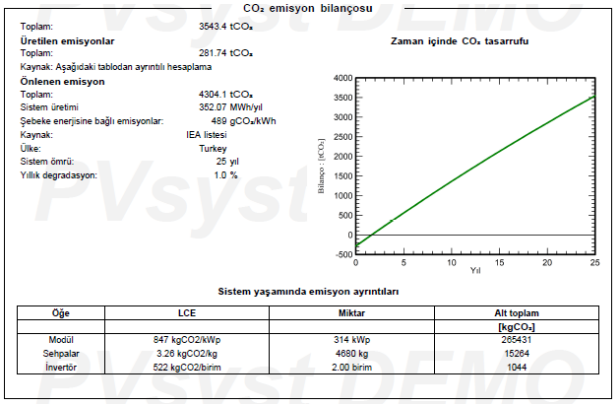
Öğe	Miktar	Birim Maliyeti	Tutar TL
PV Modül (CWT670-132PM12-V)	323	6.600,00	2.131.800,00
Panel Sehpaları	323	1.000,00	323.000,00
İnvertör (SUN2000-100KTL-M1-400Vac)	2	170.000,00	340.000,00
Diğer Parçalar			
Donatılar, Bağlantılar, vidalar	300	16,00	4,800.00
Kablolama	60	65	3900
Birleştirici Kutu	19	1.000,00	19000
İzleme Sistemi	1	25.000,00	25.000,00
Parafudr	1	3.000,00	3.000,00
Etüt ve Analizler			
Mühendislik	1	20.000,00	20.000,00
Ruhsat ve İdari Ücretler	1	20.850,00	20.850,00
Ekonomik Analiz	1	20.000,00	20.000,00
Kurulum			
Modül Başına Kurulum	323	2.000,00	646.000,00
İnvertör Başına Kurulum	2	2.000,00	4.000,00
Sevkiyat	1	32.000,00	32.000,00

Sistemde kullanılan ekipmanlara panel ve panel sehpaları için 2.454.800 TL, invertörler için 340.000 TL, izleme sistemi, bağlantı ve kablolama işlemleri için ise 55.700 TL maliyet belirlenmiş ve programa tanımlanmıştır. Kurulum maliyeti 682.000 TL olarak hesaplanmış ve sisteme eklenmiştir. Etüt ve analiz giderleri (mühendislik, ruhsat ve idari ücretler dahil) için 60.850 TL tanımlanmıştır. Yıllık bakım maliyeti kapsamında yalnızca panel temizlik gideri için 10.000 TL öngörülmüş, diğer bakım giderleri öngörülmediği için sisteme dahil edilmemiştir. Kurulumun kurum çatısında yapılması planlandığından arazi masrafı oluşmamış ve bu kalem programa eklenmemiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda, sistemin toplam kurulum maliyeti 3.593.350 TL olarak hesaplanmıştır.

Kurulum maliyetinin öz sermaye ile karşılandığı ve simülasyonu yapılan sistemin 2025 yılında hayata geçeceği varsayılmıştır. Sistemin lisanssız elektrik üretim modeli kapsamında gerçekleştirileceği ve 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun kapsamında sistemde üretilen ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin dağıtım sistemine verilmesi suretiyle söz konusu Kanuna ekli I sayılı cetvelde belirtilen fiyatlar üzerinden 10 yıl süreyle görevli tedarik şirketi aracılığıyla satın alınacağı, bu minvalde ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinden de ilave gelir elde edileceği varsayılmıştır (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 2005).

3.2 Çevresel Analiz

Şekil 19'da sunulan CO_2 emisyon bilançosu, yılda 352,07 MWh enerji üreten bir fotovoltaik (FV) sistemin, 25 yıllık ömrü boyunca Türkiye'deki şebeke enerjisine (489 g CO_2/kWh emisyon faktörü) kıyasla toplamda 3543,4 ton CO_2 emisyonunu önlediğini göstermektedir. Sistem, üretim, kurulum ve işletim aşamalarında toplam 281,74 ton CO_2 emisyonu üretmekte olup, zaman içinde doğrusal bir şekilde artan CO_2 tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 19. CO_2 emisyon bilançosu

Sistemin yaşam döngüsü emisyonları (LCE) bileşen bazında incelendiğinde, modüllerin 265.431 kg CO_2, sehpaların 15.264 kgCO_2 ve invertörlerin 1.044 kgCO_2 emisyona neden olduğu görülmektedir. Bu bulgular, toplam emisyonların %93'ten fazlasının modüllerin üretim aşamasından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Yıllık %1'lik degradasyon göz önüne alındığında, sistem, Türkiye'nin 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşma çabalarına anlamlı bir katkı sunmaktadır. Önlenen 3543,4 ton CO_2 emisyonu, ortalama bir otomobilin yıllık 2-3 ton CO_2 emisyonu ürettiği varsayımıyla yaklaşık 1477 otomobilin yıllık emisyonuna eşdeğer bir tasarruf sağlamaktadır. Bu miktar, Türkiye'nin enerji sektörünün dekarbonizasyonu, emisyon azaltım hedeflerine ulaşılması, sürdürülebilir kalkınmanın desteklenmesi ve teknolojik inovasyonun teşvik edilmesi bağlamında kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, bu tür projelerin yaygınlaştırılması, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir bir gelecek inşa etme

hedeflerine ulaşması açısından stratejik bir öneme sahiptir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Hatay ili Kırıkhan ilçesinde bulunan bir kamu kurumu binası için çatı tipi güneş enerji santrali (GES) tasarımı, PVsyst 7.4.5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem, 216 kWp nominal güce sahip olup, toplamda yılda 352.043 kWh enerji üretimi öngörmektedir. Sistem performans oranı (PR), bir güneş enerji sisteminin gerçek çıktısının teorik potansiyeline kıyasla ne kadar verimli çalıştığını gösteren bir ölçüttür. Bu çalışmada, sistemin performans oranı %81,2 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, sistemin optimum performans seviyesine yakın bir şekilde çalıştığını ve enerji üretiminde verimli bir performans sergilediğini göstermektedir. Tasarlanan sistemin çevresel etkileri incelendiğinde, üretilen enerjinin, 489 gCO_2/kWh emisyon faktörüne sahip şebeke enerjisine alternatif olarak kullanılmasıyla, 25 yıllık ömrü boyunca 3543,4 ton CO_2 emisyonunun önlendiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sistemin üretim, kurulum ve işletim aşamalarından kaynaklanan toplam CO_2 emisyonu 281,74 ton olarak hesaplanmıştır. Yaşam döngüsü emisyonlarının bileşen bazlı analizi, modüllerin 265.431 $kgCO_2$, sehpaların 15.264 $kgCO_2$ ve invertörlerin 1.044 $kgCO_2$ emisyona neden olduğunu göstermiştir. Modüllerin toplam emisyonlardaki %93'lük payı, çevresel iyileştirme çalışmalarında odak noktasının bu bileşene yönelik olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Sistem, 2022 yılında bina tarafından tüketilen toplam 241.585 kWh elektrik enerjisinin %145,7 oranında fazlasını üreterek, büyük çapta kendi ihtiyacını karşılayabildiğini ve fazla enerjinin şebekeye aktarılabileceğini göstermiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, sistem tasarımı hem mevcut enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir hem de ihtiyaç fazlası elektrik üretimiyle ekonomik bir kazanç sağlamaktadır. Yıllık %1'lik degradasyon oranı dikkate alındığında bile, sistemin uzun vadede bina enerji ihtiyacını karşılama kapasitesini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin bina ölçeğinde sürdürülebilir bir enerji çözümü sunduğunu doğrulamaktadır. Ekonomik analizler, sistemin toplam kurulum maliyetinin 3.593.350 TL olduğunu ortaya koymuştur.

Tasarlanan sistemin ekonomik analizine göre, yatırımın geri ödeme süresi 4,2 yıl olup, bu süre makul bir yatırım geri dönüş süresi olarak değerlendirilebilir. Net Bugünkü Değerin (NBD) 17.898.103 TL olması, yatırımın finansal açıdan kârlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, %23,81'lik İç Karlılık Oranı (IKO), yatırımın iskonto oranından daha yüksek bir getiri sunduğunu ortaya koymaktadır. %498,1'lik Yatırımın Geri Dönüşü (ROI) ise yatırımın oldukça verimli olduğunu ve yüksek kârlılık sunduğunu göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, bu ekonomik göstergeler, yatırımın finansal açıdan avantajlı ve uygulanabilir olduğunu desteklemektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile Hatay ilindeki iklim şartları ve enerji ihtiyacına uygun bir çatı üstü güneş enerji sistemi tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sistemin hem ekonomik hem de çevresel performansı, bölge özelinde diğer yapılara uygulanabilecek bir model sunmaktadır. Simülasyon sonuçları, tasarımın ilgili binanın enerji ihtiyacını karşılama konusunda oldukça uygun olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, benzer projelerin ülke genelinde yaygınlaştırılması, sürdürülebilir enerjiye geçişi hızlandıracak ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmasında önemli bir adım olacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Doç.Dr. Ahmet YÖNETKEN danışmanlığında 30.01.2025 tarihinde sunduğumuz Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali Tasarımı, Ekonomik ve Çevresel Analizi (Hatay İli Örneği) başlıklı yüksek lisans tezi esas alınarak hazırlanmıştır

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Akarslan, E., ve Hocaoğlu, F. O., 2018. Bir Fotovoltaik Güç Sisteminin Üretiminin Çok Boyutlu Tahmin Filtreleri ile Modellenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **18(2)**, 516-522.

Akcan, E., Kuncan, M., ve Minaz, M. R. 2020. PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi **(18),** 248-261. https://doi.org/10.31590/ejosat.685909

Aytekin, A., 2005. Yatırım Projelerinin Bilgisayar Paket Programı ile Değerlendirilmesi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, **7(7)**, 62-71.

Batmaz, T., Bayraç, H. N., ve Güllü, M., 2019. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Büyüme ve Karbon

Emisyonu İlişkisi. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, **6(3)**, 645-658.

Birpınar, M. E., 2022. Küresel Sorun: İklim Değişikliği "Gelişimi, Uluslararası Müzakereler ve Türkiye. Çevre Şehir ve İklim Dergisi, **1(1)**, 20-36.

Bulut, N., Kuncan, M. ve Horoz, S., 2018. Türkiye'de güneş enerjisinin kullanım alanları ve Siirt güneş enerji potansiyeli. Ahtamara 1. Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Kongresi. Gevaş, Van, 1315-1319.

Cesur Durmaz, B., ve Üçgül, İ., 2024. Türkiye Kıyı Bölgelerinde Yenilenebilir Enerji Santrali Uygulamaları İçin: Hibrit Yüzer Modüler Tasarım Önerileri. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **24(4)**, 866-883. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1404846

Çınaroğlu, H., 2023. Bağımsız Bir Fotovoltaik Sistemin Pvsyst Yazılımı Kullanılarak Tasarımı ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik, 99.

Çiftçi, S., Solak, M., and Kuncan, M., 2020. Powered by the sun: designing and analyzing technical and economic aspects of a school sustained by photovoltaics. Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering, **1(1)**, 21-32.

Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, 2019, T.C Resmî Gazete, 12.05.2019,30772.

Erdoğan, S., 2020. Enerji, Çevre ve Sera Gazları. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, **10(1)**, 277-303. https://doi.org/10.18074/ckuiibfd.670673

EÜAŞ, 2023. Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu 2023, Ankara.

Gündüz, M.S., 2019. Bir Fotovoltaik Güneş Enerji Santralinin Tekno-Ekonomik Analizi; Kütahya-Simav Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 109.

Gürtepe, E., ve Birpınar, M. E., 2023. Türkiye Yüzyılında Sürdürülebilir Çevre. Çevre Şehir ve İklim Dergisi, **2(3)**, 1-22.

Hamza Çelikyay, H., ve Küçük Bayraktar, H., 2023. İklim Politika Belgelerinde İklim Dostu Kentler ve Dirençlilik Stratejileri. Humanıtas-Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi, **11**(INCSOS VIII Özel Sayısı) , 87-107. https://doi.org/10.20304/humanitas.1272124

Ismahane, S. Z., Zohra, A. F., Mouhoub, B., Mahammedi, N. A., and Bechouat, M., 2023. Sizing And Techno-Economic Analysis of a Photovoltaic Solar System for a Primary School Using PVSYST. In 2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM) Vol. 1, pp. 1-6. IEEE.

https://doi.org/10.1109/IC2EM59347.2023.10419605.

Karakaya, E., 2016. Paris İklim Paylaşımı: İçeriği ve Türkiye Üzerine Bir Değerlendirme. Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, **3(1)**, 1-12. https://doi.org/10.30803/adusobed.188842

Kılınç, E. C., ve Altıparmak, H., 2020. Çevre Vergilerinin CO_2 Emisyonu Üzerindeki Etkisi Üzerine Bir Uygulama. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, **10(1)**, 217-227.

Kırnapçı, S. ve Pamuk, N., 2024. Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerjisi Santralinin Farklı Simülasyon Programları ile Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Üretim Sonuçlarının Değerlendirilmesi. Karadeniz Mühendislik ve Bilim Dergisi, **7(3)**, 529-538. https://doi.org/10.34248/bsengineering.1460518

Koç, E., ve Kaya, K., 2015. Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. Mühendis ve Makina, **56(668)**, 36-47.

Martin, K., 2024. Elbistan Meslek Yüksekokulu Çatı Üstü Güneş Enerjisi Santrali Kurulum Simülasyonu: Performans Analizi. KİÜ Fen, Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, **1(1)**, 33-42.

Mishra, P. R., Rathore, S., and Jain, V., 2024. Pvsyst Enabled Real Time Evaluation of Grid Connected Solar Photovoltaic System, International Journal of Information Technology, **16(2)**, 745-752. https://doi.org/10.1007/s41870-023-01677-x

Öztürk, B., Akyazı, Ö., Şahin, M. ve Yılmaz, G., 2023. Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrali'nin Modellenmesi ve Simülasyon Analizi: Ağrı/Çukurçayır Köyü 999 kW Güneş Enerjisi Santrali Örneği. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, **13(4)**, 1623-1647. https://doi.org/10.31466/kfbd.1327312

Pala, A., 2018. Gelişmekte Olan Ülkelerde Enerji Tüketimi, Karbon Emisyonu ve Ekonomik Büyüme İlişkisinin ARDL Yaklaşımı ile İncelenmesi. Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, **14**, 1-29.

Sancar, M. R., ve Altınkaynak, M., 2021. Isparta İli İçin Farklı Çatı Tiplerinde Tasarlanan Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi **(32)**, 1024-1028. https://doi.org/10.31590/ejosat.1047453

Sarı, V., ve Özyiğit, F. Y., 2020. Sivas İlinin Farklı İlçelerinde Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrallerinin Tasarımı ve Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi **(20)**, 425-437. https://doi.org/10.31590/ejosat.797434

Şahin, Z. R., 2024. Gerçekten Sanala: 1 Mwp Güneş Santralinin Pvsyst Simülasyon Programıyla Performans Analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **11(23)**, 203-215. https://doi.org/10.54365/adyumbd.1471211

TEİAŞ 2023, Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri 2023, Ankara.

Yalılı Kılıç, M. ve Kurtaran, M., 2024. Sürdürülebilir Enerji Üretimi İçin Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve PVsyst Programı ile Simülasyonu: Bursa İli Örneği. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, **11(1)**, 239-248. https://doi.org/10.30910/turkjans.1333711

Yalılı, M., 2021. Lisanslı fotovoltaik güneş enerji santrali yatırımının finansal analizi: Van ili örneği. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, **10(3)**, 1055-1074.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 2005, T.C Resmî Gazete, 18.05.2005,25819.

Yıldırım, H. H., ve Aksu, M., 2021. Rüzgâr ve Güneş Enerjisi Santral Yatırımlarının Ekonomik Performanslarının Değerlendirilmesi. Uluslararası Bankacılık Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, **4(1)**, 53-75. https://doi.org/10.52736/ubeyad.933756

5.1 İnternet Kaynakları

1- https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (18.01.2025)
2- https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/renewables-support-mechanism/licensed-generation-amount/real-time-generation (19.01.2025)
3- İklim Şurası Sonuç Bildirgesi, https://iklimsurasi.gov.tr/sayfa/sonuc-bildirgesi, (20.09.2024)
4- https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik (19.01.2025)
5- Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), https://gepa.enerji.gov.tr/pages/31.aspx, (25.09.2024)
6- Kırıkhan Meslek Yüksekokulu uydu görüntüsü, Google Maps, (25.08.2024)
7- https://solaravm.com/ (19.01.2025)