

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ

FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Necmettin Erbakan University
Journal of Science and Engineering

CİLT: 6 SAYI: 1
YIL: 2024



e-ISSN: 2667-7989

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING

E-ISSN: 2667-7989

Cilt/Volume: 6, Sayı/Issue: 1, (Nisan/April, 2024)

Uluslararası Hakemli Dergi/*International Referred Journal*

İmtiyaz Sahibi/Holder of Concession

Necmettin Erbakan Üniversitesi Rektörü

Rector of Necmettin Erbakan University

Prof. Dr. Cem ZORLU

Baş Editör/Editor-in-Chief

Doç. Dr. Fatih ERCİ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Assoc. Prof., Necmettin Erbakan University

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Dr. Ahmet Burçin BATIBAY Necmettin Erbakan Üniversitesi

Ph.D. Necmettin Erbakan University

Doç. Dr. Emrah MADENCİ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Assoc. Prof., Necmettin Erbakan University

Doç. Dr. Nihat AKGÜNEŞ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Assoc. Prof., Necmettin Erbakan University

Yayına Hazırlık ve Mizanpaj Editörleri/Layout Editors

Arş. Gör. Behiç Selman ERDOĞDU, Necmettin Erbakan Üniversitesi

(Res. Asst.), Necmettin Erbakan University

Arş. Gör. Canan SEVİNÇ ŞAŞMAZ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

(Res. Asst.), Necmettin Erbakan University

Arş. Gör. Dr. Merve ÖZCAN TÜRKMEN, Necmettin Erbakan Üniversitesi

(Res. Asst., Ph.D.), Necmettin Erbakan University

Arş. Gör. Halil İbrahim AYZAZ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

(Res. Asst.), Necmettin Erbakan University

İstatistik Editörü/Statistical Editor

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet PEKGÖR, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Asst. Prof., Necmettin Erbakan University

Dil Editörü/Language Editor

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DEMİRTAŞ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Asst. Prof., Necmettin Erbakan University

Arş. Gör. Tuba ULUSOY, Necmettin Erbakan Üniversitesi

(Res. Asst.), Necmettin Erbakan University

Sekreter/Secretary

Arş. Gör. Esra TANHAŞ (*Res. Asst.*)

Arş. Gör. Ömer Faruk ATİZ (*Res. Asst.*)

Yayın Türü/Publication Type

Yerel Süreli Yayın/*Local Periodical*

Yazışma Adresi/Correspondence Address

Necmettin Erbakan Üniversitesi Rektörlüğü, 42090, Meram, Konya, Türkiye

Telefon/Phone: +90 (332) 221 05 00 **web:** www.dergipark.gov.tr/neufmbd **e-posta/e-mail:** neufmbd@erbakan.edu.tr

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, yılda üç kez yayınlanan uluslararası hakemli bir dergidir. *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering is an international referred journal published three issues per year.*

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Akdeniz Bölgesi (Antalya/Türkiye) Makroalg Türlerinin Makro ve İz Element Seviyelerinin Belirlenmesi <i>Determination of Macro and Trace Element Levels of Macroalgae Species the Mediterranean Region (Antalya/Türkiye)</i> GÜMÜŞ, Numan Emre; KESKİNKAYA, Hatice Banu; OKUDAN, Emine Şükran; AKKÖZ, Cengiz.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	1-9
Newton'un Soğuma Yasası Denklemine Kashuri Fundo Dönüşümü ile Analitik Çözümü <i>Analytical Solution of Newton's Law of Cooling Equation via Kashuri Fundo Transform</i> PEKER, Bilge; ÇUHA, Fatma Aybike; PEKER, Haldun Alpaslan.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	10-20
Farklı İklim Bölgelerinde TOKİ Tip Konutlarının Doğal Havalandırma Analizi <i>Natural Ventilation Analysis of TOKİ Type Houses on Different Climate Regions</i> ARSLAN, Hatice Derya; ACAR BİLGİLİ, Sümeyye Merve; DOĞAN, Sercan.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	21-39
Tasarım Davranış Spektrumunun Saha Etkisi Dikkate Alınarak Değerlendirilmesi: Kocaeli Bölgesi Uygulaması, Türkiye <i>Considerations of Design Response Spectrum Involving Site Effect: Application to the Kocaeli Region, Türkiye</i> GUZEL, Yusuf; GUZEL, Fidan.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	40-57
Kiral Diazadioksokaliks[2]aren[2]triazin Bazlı Organokatalizörün Nitrostirenler ile Antronun Enantioselektif Michael Tepkimesinde Kullanılması <i>Chiral Diazadioxocalix[2]arene[2]triazine-Based Derivative as Organocatalyst for Enantioselective Michael Reaction of Nitrostyrenes with Anthrone</i> ÖZGÜN, Ümmü; GENÇ, Hayriye Nevin; SIRIT, Abdulkadir.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	58-68
Türkiye'de Fotovoltaik Sistemlerin Fizibilitesinin Değerlendirilmesi: On-Grid, Off-Grid ve Şebeke Ölçekli FV Kurulumlarının Teknik ve Ekonomik Analizi <i>Assessing the Feasibility of Photovoltaic Systems in Türkiye: Technical and Economic Analysis of On-Grid, Off-Grid, and Utility-Scale PV Installations</i> AKGAYEV, Berkeli; AKBAYRAK, Serdar; YILMAZ, Mücahit; BÜKER, Mahmut Sami; ÜNSÜR, Veysel.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	69-92
Filaman Sarım CETP Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin ve Hasar Gelişiminin Halka Çekme Testi ile İncelenmesi <i>Investigation of Mechanical Properties and Damage Development of Filament Wound GFRP Composite Pipes by Ring Tensile Test</i> GEMİ, Lokman; AZEEM, Mohammad; YAZMAN, Şakir; KAYIRICI, Mehmet; GÖK, Onur.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	93-104
Aylık Yağış ve Bağıl Nemdeki Eğilimlerin Değerlendirilmesi: Konya'da İklim Değişikliği Referansı İçin Kapsamlı Bir Analiz <i>Assessing Trends in Monthly Precipitation and Relative Humidity: An Analysis for Climate Change Reference in Konya</i> ERYÜRÜK, Kağan; ERYÜRÜK, Şule.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	105-114
ROC Analizinde Doğruluk Oranına Dayalı Uyarlanmış Kesme Değerleri ve Performans Karşılaştırmaları <i>Adapted Cut-Off Values and Performance Comparisons Based on Accuracy Rate in ROC Analysis</i> PEKGÖR, Ahmet; KARAKOCA, Aydın.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	115-123

Yumurtalı ve Yumurtasız Formüle Edilen Madımak (<i>Polygonum cognatum</i>) Tozu İlaveli Eriştelerin Fonksiyonel İeriği ve Duyusal Özellikleri <i>Functional Content and Sensory Properties of Madımak (<i>Polygonum cognatum</i>) Powder Added Noodles Formulated With and Without Eggs</i> CANKURTARAN KÖMÜRCÜ, Tekmile; BİLGİÇLİ, Nermin.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	124-138
Uçucu Kül Katkısının Derin Karıştırma Kolonlarının Sıkışabilirliğine Etkisi <i>Effect of Fly Ash Replacement on Compressibility of Deep Mixing Columns</i> YENGİNAR, Yavuz; OLGUN, Murat.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	139-152
Montaj Sistemlerinde Tesis İçi Lojistik Kararları Altında Hat Yerleşim Stratejilerinin Karşılaştırılması <i>Comparison of Line Layout Strategies in Assembly Systems under In-Plant Logistics Decisions</i> ŞAHİN, Pelin; KARAAĞAÇ, Ayşe; SUNULU, Esmā; ERVURAL, Bilal.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	153-165
Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasının P-Medyan Problemlerine Uygulanması <i>Implementation of Grey Wolf Optimization Algorithm to P-Median Problems</i> ORUCOVA BÜYÜKÖZ, Gülşen; HAKLI, Hüseyin.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	166-177
Yüksek ve Düşük Plastisiteli Killerde Polipropilen Elyafın Etkisi <i>The Influence of Polypropylene Fiber on High and Low Plasticity Clay</i> SOĞANCI, Ali Sinan; ORMAN, Ali.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	178-187
NLS Yüzeyinin Spacelike Eğrisinin Pseudo Null Darboux Çatısı ile Geometrik Analizi <i>Geometric Analysis of the NLS Surface with the Pseudo Null Darboux Frame of Spacelike Curve</i> ERDOĞDU, Melek; YAVUZ, Ayşe.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	188-198

Alan Editörleri/Editorial Board

Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi/ <i>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University</i>
Prof. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAĞI	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Gökhan ZENGİN	Selçuk Üniversitesi/ <i>Selçuk University</i>
Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN	Afyon Kocatepe Üniversitesi/ <i>Afyon Kocatepe University</i>
Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Mesut UYANER	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi/ <i>Karamanoğlu Mehmetbey University</i>
Prof. Dr. Sedat PAK	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi/ <i>Karamanoğlu Mehmetbey University</i>
Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK	Gazi Üniversitesi/ <i>Gazi University</i>
Prof. Dr. Senar AYDIN	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Ali SARIBIYIK	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi/ <i>Sakarya University of Applied Sciences</i>
Doç. Dr. Alper ALVER	Aksaray Üniversitesi/ <i>Aksaray University</i>
Doç. Dr. Alper SİNAN	Akdeniz Üniversitesi/ <i>Akdeniz University</i>
Doç. Dr. Aydın KARAKOCA	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi/ <i>Afyon Kocatepe University</i>
Doç. Dr. Derya BAL ALTUNTAŞ	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi/ <i>Recep Tayyip Erdoğan University</i>
Doç. Dr. Esra YALDIZ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Hüseyin Zahit SELVİ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Mehmet HACİBEYOĞLU	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Mustafa KUNTOĞLU	Selçuk Üniversitesi/ <i>Selçuk University</i>
Doç. Dr. Mustafa Kürşat DEMİR	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Ummahan EGE ARSLAN	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/ <i>Eskişehir Osmangazi University</i>
Dr. Çiğdem AŞÇIOĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi/ <i>Afyon Kocatepe University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi/ <i>Sakarya University of Applied Sciences</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem AŞÇIOĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi/ <i>Afyon Kocatepe University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Emrehan YAVŞAN	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi/ <i>Tekirdağ Namık Kemal University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Fatma BAYRAM SARIİPEK	Konya Teknik Üniversitesi/ <i>Konya Technical University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kürşat ÖKSÜZ	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi/ <i>Erzincan Binali Yıldırım University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Murat KARAKOYUN	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YALÇIN	Afyon Kocatepe Üniversitesi/ <i>Afyon Kocatepe University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Vahit TONGUR	Konya Teknik Üniversitesi/ <i>Konya Technical University</i>
Dr. Rıza BÜYÜKZEREN	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Dr. Yasemin TABAK	Tübitak Marmara Araştırma Merkezi/ <i>Tübitak Marmara Research Center</i>

Yayın ve Danışma Kurulu /Editorial and Advisory Board

Prof. Dr. Ahmet CAN	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Aşır GENÇ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Atilla EVCİN	Afyon Kocatepe Üniversitesi/ <i>Afyon Kocatepe University</i>
Prof. Dr. Didem BALKANLI	Yıldız Teknik Üniversitesi/ <i>Yıldız Technical University</i>
Prof. Dr. Erdal KOCABAŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Haluk BİNGÖL	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Hasan KOTAN	Bursa Teknik Üniversitesi/ <i>Bursa Technical University</i>
Prof. Dr. Hicran AÇIKEL	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Hidayet OĞUZ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. İbrahim KALAYCI	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Mehmet AKTAN	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Mehmet KARALI	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Nilgün ERTAŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Ömer İŞILDAK	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi/ <i>Tokat Gaziosmanpaşa University</i>
Prof. Dr. Sabri ALPAYDIN	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Sabri KOÇER	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Süleyman KALELİ	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Prof. Dr. Ümmügülüm DAĞLIOĞLU	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AKYÜREK	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>

Akdeniz Bölgesi (Antalya/ Türkiye) Makroalg Türlerinin Makro ve İz Element Seviyelerinin Belirlenmesi

Numan Emre GÜMÜŞ¹  Hatice Banu KESKİNKAYA² 
Emine Şükran OKUDAN³  Cengiz AKKÖZ⁴ 

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kazım Karabekir Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Karaman, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Konya, Türkiye

³ Akdeniz Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Antalya, Türkiye

⁴ Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 03.10.2023

Kabul Tarihi: 10.12.2023

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Ağır metal,
Antalya,
Element kompozisyonu,
Makroalg.

Algler denizel ortamdaki en büyük biyokütleyle sahip olan üreticilerden biri olarak ekosistemimizin önemli bir parçasıdır ve artan kirlilik sorununu izlemeye yardımcı olabilirler. Çalışmamızda, Antalya (Türkiye) kıyı alanlarından 2019 yılı yaz sezonunda toplanan *Jania rubens*, *Pterocladia capillacea*, *Ulva intestinalis*, *Halopteris scoparia*, *Ellisolandia elongata* ve *Halopithys incurva* makroalg örneklerinde makro (Ca, Mg, K, Na, P) ve iz element (Fe, Cd, Zn, Co, Mo, Ni, Cr) konsantrasyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Element konsantrasyonları ICP-OES cihazıyla analiz edilmiştir. Elementler arasındaki pozitif ve negatif ilişkiler Pearson Korelasyon İndeksi ile analiz edilmiştir. Tüm örneklerde makro element düzeyleri iz element düzeylerinden daha yüksek bulunmuştur. Makroalg örneklerinde Ca, en yüksek konsantrasyonda bulunan makro element olarak belirlenirken, Fe ise iz element konsantrasyonu en yüksek olan metal olarak tespit edilmiştir. *U. intestinalis* türünde Mo, Cd ve Co, *H. scoparia* türünde Mo, *H. incurva* ve *P. capillacea* türünde Cd, *E. elongata* türünde Mo elementi tespit edilebilir limit değerlerinin altında kalmıştır. Çalışmamızda elde edilen veriler literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında sonuçların paralellik gösterdiği gözlenmiştir. Sucul ortamlara eksojen bileşiklerin girişi, ekosistemlerin sağlığı için gerçek bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, geri dönüşü olmayan birtakım zararlara neden olmadan önce bu bileşiklerin doğal ortamdaki varlıklarını tespit etmek ve olumsuz çevresel etkilerini yenmek için etkin bir teknoloji geliştirmek son derece önem arz etmektedir.

Determination of Macro and Trace Element Levels of Macroalgae Species the Mediterranean Region (Antalya/Türkiye)

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 03.10.2023

Accepted: 10.12.2023

Published: 30.04.2024

Keywords:

Antalya,
Elemental composition,
Heavy metal,
Macroalgae.

Algae is an important part of our ecosystem as one of the producers with the largest biomass in the marine environment and they can help monitoring the growing pollution problem. In our study, macro (Ca, Mg, K, Na, P) and trace elements (Fe, Cd, Zn, Co, Mo, Ni, Cr) concentrations were determined. In *Jania rubens*, *Pterocladia capillacea*, *Ulva intestinalis*, *Halopteris scoparia*, *Ellisolandia elongata* and *Halopithys incurva* macroalgae samples collected from Antalya (Türkiye) coastal areas in the summer season of 2019. Element concentrations were analyzed with the ICP-OES device. Positive and negative relationships between elements were analyzed with Pearson Correlation Index. Macro element levels were found to be higher than trace element levels in all samples. While Ca was determined as the macro element with the highest concentration in macroalgae samples, Fe was determined as the metal with the highest trace element concentration. Mo, Cd and Co elements in *U. intestinalis* species, Mo element in *H. scoparia*, Cd element in *H. incurva* and *P. capillacea*, Mo element in *E. elongata* remained below the detection limit values. When the data obtained was compared with other studies in the literature, it was observed that the results were parallel. The introduction of exogenous compounds into aquatic environments poses a real risk to the health of ecosystems. Therefore, it is extremely important to detect the presence of these compounds in the natural environment before they cause irreversible damage and to develop an effective technology to overcome their negative environmental effects.

To cite this article:

Gümüş, N.E., Kesinkaya, H.B., Okudan, E.Ş. & Akköz, C. (2024). Akdeniz Bölgesi (Antalya/ Türkiye) Makroalg Türlerinin Makro ve İz Element Seviyelerinin Belirlenmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.28>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Numan Emre Gümüş, numanemregumus@kmu.edu.tr



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

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağır metaller çevreye; rafineri, madencilik, sanayi, doğal kaynaklar ve tarımsal kaynaklı yollarla yayılmaktadır[1]. Yerkabuğunda genelde eser miktarda bulunan ağır metaller, geniş bir çevresel matris aralığında eser konsantrasyonları nedeniyle iz elementler olarak sınıflandırılırlar. Kıyı ortamındaki ağır metal kirliliği, deniz sağlığına olumsuz etkileri nedeniyle büyük bir endişe kaynağıdır [2].

Sucul alanlarda yaşayan birincil üreticiler olan deniz algleri, ilaç, kozmetik, gıda, yakıt ve tekstil endüstrilerinde önemli rol oynayan ökaryotik ve ötrofik organizmalar olmaları nedeniyle uzun yıllardır birçok araştırmaya konu olmaktadır [3,4]. Deniz algleri, deniz ortamında en büyük biyokütleyle sahip olan üreticilerden ve yaklaşık 2 milyon tonunun denizlerden ve okyanuslardan toplandığı ve yapay sistemde kültürlendiği tropikal ekosistemde en yüksek düzeyde bulunan doğal kaynaklardan biridir [5].

Dünya nüfusunun artışı, iklim değişikliği, insanların doğaya verdiği zararın artmasıyla birlikte günden güne su kaynaklarının üstündeki baskıda artmaktadır [3,4]. Sürdürülemez sanayi ve artan zenginlik talebi doğal ekosistemleri daha çok tahrip etmektedir [8-10]

Bu nedenle, kül ve istenmeyen kimyasal elementlerin konsantrasyonunu azaltmak için deniz yosununa belirli bir ön işlemin uygulanması gerekip gerekmediğinin belirlenmesine olanak tanıyan bu çeşitli kimyasal elementlerin (makro ve iz elementler) tanımlanması ve miktarının belirlenmesi son derece önemlidir [11,12].

Deniz ortamının izlenmesi, çevre koruma politikasının geliştirilmesinde ve devam eden eylemlerin etkinliğinin değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Deniz yosunlarının, iz elementlerin biyobirikimine yönelik yüksek potansiyelleri ve kimyasal bileşimlerinin şekillenmesinde stresörlerin gözle görülür etkisi nedeniyle oldukça iyi bir gösterge organizma olduğu düşünülmektedir. Alglerin kimyasal bileşiminin değerlendirilmesi de önemlidir çünkü çok sayıda deniz yosunu türü gıda olarak kullanılmaktadır [13].

Dünyada hem denizlerde hem de tatlı sularda ağır metal düzeylerini belirleyebilmek için indikatör organizmalar olarak genellikle makroalg türleri tercih edilmektedir. Makroalgler, morfolojik yüzeylerindeki yüksek negatiflik sebebiyle birçok ağır metal iyonunu çekebilir ve depolayabilirler. Bu da makroalglerdeki ağır metal kontaminasyon seviyelerinin biyo-izlenmesi, çevreyi değerlendirmek ve kontrol etmek için önemlidir [14,15]. Makroalglerdeki metal içerikleri, türler ve yerler arasında değişiklik gösterir. Makroalgler türleri, hareket kabiliyetine sahip olmadıkları ve kirlenici maddelerden kaçamadıkları için yararlı biyo-göstergeler olarak işlev görürler ve ayrıca bunların bolluğu ve dağılımı deniz kıyısı ortamının sağlığını yansıtabilir. Ayrıca, makroalglerin nispeten kolay elde edilişi, onları kirlilik çalışmalarında uygun türler haline getirmektedir [16].

Türkiye'nin Akdeniz kıyıları, özellikle tarım kaynaklı ötrofikasyon ve kirlilik sorunlarının etkisi altındadır [17,18]. Bu çalışmada amacımız Antalya sahilinden toplanan makroalg örnekleri olan *J. rubens* (Linnaeus) J.V.Lamouroux 1816, *P. capillacea* (S.G.Gmelin) Bornet 1876, *U. intestinalis* Linnaeus 1753, *H. scoparia* (Linnaeus) Sauvageau 1904, *E. elongata* (J.Ellis & Solander) K.R.Hind & G.W.Saunders 2013 ve *H. incurva* (Hudson) Batters 1902 türlerinin makro element (Ca, Mg, K, Na, P) ve iz element (Fe, Cd, Zn, Co, Mo, Ni ve Cr) konsantrasyonlarını ve birikim düzeylerini araştırmaktır. Tespit edilen makro ve iz element düzeyleri yapılan diğer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

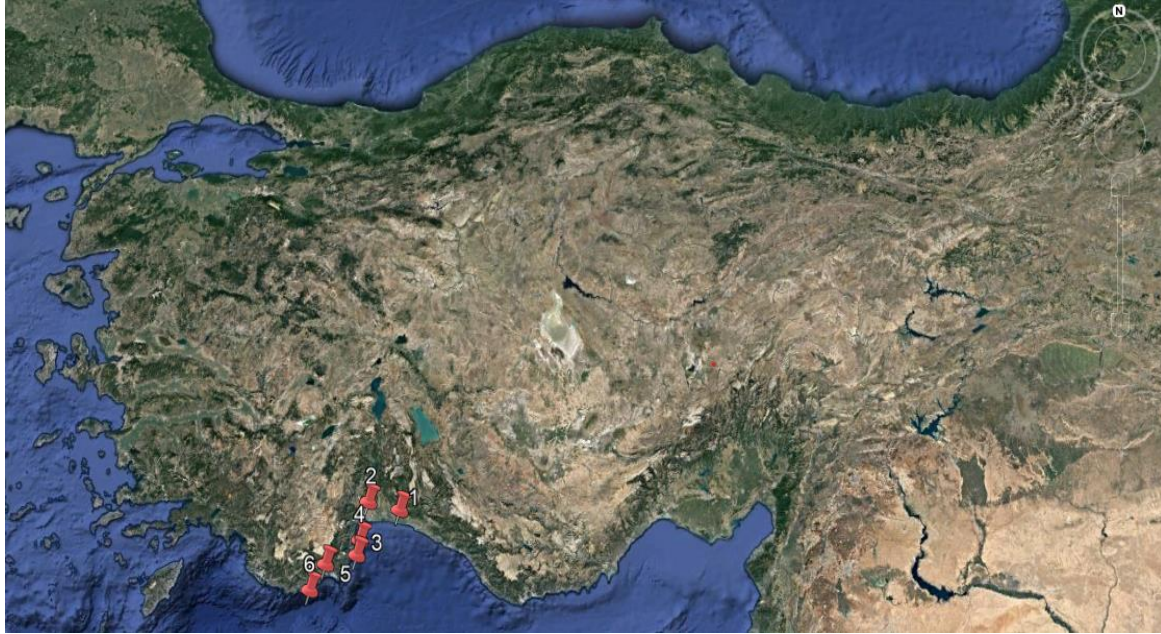
MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışma Alanı (Study Area)

Çalışma alanımızı oluşturan Antalya ili Türkiye'nin güneybatısında yer almakta olup turizm faaliyetleri açısından gelişmiş bir ilimizdir. Örneklerin alındığı istasyonumuz Antalya il sınırları içerisinde olup İstasyonlara ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Örnekleme yapılan istasyonlar ve bölgenin uydu görüntüsü Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Türlerin Alındığı İstasyonlar ve Koordinatları

Tür	İstasyon	Koordinat
<i>J. rubens</i>	Antalya/ Alacasu	36°32'7.28"K 30°33'28.94"D
<i>P. capillacea</i>	Antalya/ Gök Liman	36°16'41.17"K 30° 8'28.51"D
<i>U. intestinalis</i>	Antalya/ Demre Çay Ağzı	36°13'42.30"K 29°56'23.31"D
<i>H. scoparia</i>	Antalya/ Phaselis	36°31'33.93"K 30°33'8.64"D
<i>E. elongata</i>	Antalya/ Yat Limanı	36°53'3.95"K 30°42'5.25"D
<i>H. incurva</i>	Antalya/ Boğazak- Serik	36°49'59.84"K 31° 7'28.67"D



Şekil 1. Örnekleme istasyonunun ve bölgenin uydu görüntüsü.

Makroalglerin Toplanması ve Tanımlanması (Sampling and Identification of Macroalgae)

Çalışmamızdaki 6 makroalg türü 2019 yılında Antalya kıyı bölgesinde alglerin yoğun olduğu dönemlerde, daha önce belirlenen istasyonlardan toplanmıştır. Toplanan örnekler steril cam şişelere konularak soğuk zincirde laboratuvara getirilmiştir. Alglerin morfolojik tanımlaması ışık mikroskobu ile yapılmıştır. *J. rubens* (Linnaeus) J.V.Lamouroux 1816, *P. capillacea* (S.G.Gmelin) Bornet 1876, *U. intestinalis* Linnaeus 1753, *H. scoparia* (Linnaeus) Sauvageau 1904, *E. elongata* (J.Ellis & Solander) K.R.Hind & G.W.Saunders 2013 ve *H. incurva* (Hudson) Batters 1902 türlerinin tanımlanmasında Algbase sitesinden yararlanılmıştır [19]. Distile su kullanılarak nekrotik materyalleri uzaklaştırılmıştır. Temizlenen örnekler gölgede kurutulmaya bırakılmıştır. Kurutulan algler toz haline getirilmiş ve analizlere kadar +4 °C de muhafaza edilmiştir.

Analizi yapılan türlerden 1'i Chlorophyta üyesi (yeşil alg) (*U. intestinalis*), 4'ü Rhodophyta üyesi (kırmızı alg) (*J. rubens*, *P. capillacea*, *E. elongata*, *H. incurva*) ve 1'i Ocrophyta (kahverengi

alg) (*H. scoparia*) üyesidir (Şekil 2).

Makro ve İz Element Analizi (Macro and Trace Element Analysis)

Alg örnekleri öncelikle etüvde 105°C de 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan örneklerden 0.2 g alınmış ve 6 mL nitrik asit (%65 HNO₃ mL⁻¹) ve 2 mL saf su ilave edildikten sonra bir müddet asidin çıkması beklendikten sonra örnekler mikrodalgaya (Cem Mars 6) koyularak çözündürme işlemi yapılmıştır. Mikrodalgadan çıkartılan örnekler soğutulularak 100 mm mavi band filtre kağıdından süzülmüş, daha sonra falcon tüplerine aktarılarak deiyonize su ile hacmi 20 mL'ye tamamlanmıştır. Analize hazır hale gelen örnekler İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optic Absorbsiyon Spektrofotometresinde (ICP-OES) (Varian Vasta) ölçülmüştür. Cihazda ölçülen elementlerin dalga boyları sırasıyla Ca 317,933 nm, K 766,491 nm, Mg 279,553 nm, Na 589,592 nm, P 213,618 nm, Co 238,892, Mo 202,032 nm, Cd 214,439 nm, Cr 267,716 nm, Fe 238,204 nm, Ni 231,604 nm ve Zn 213,857' dir.



Şekil 2. Makroalglerin su altı görüntüsü
(a) *E. elongata*, (b) *J. rubens*, (c) *U. intestinalis*, (d) *H. scoparia*, (e) *H. incurva* (f) *P. capillacea*.

İstatiksel Analiz (Statistical Analysis)

Alg örnekleri içerisindeki her bir metal parametresi arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için Pearson Korelasyon İndeks SPSS 22 paket programı kullanılarak uygulanmıştır.

BULGULAR (RESULTS)

Antalya kıyılarından toplanan makroalglerin makro ve iz element konsantrasyonlarına ait ortalama değerleri Tablo 2’de verilmiştir. ICP-OES analizi sonucunda makroalg örneklerinde belirlenen parametrelerin ilişkilerini ve korelasyonlarını göstermek için uygulanan Pearson Korelasyon İndeksi analizi sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Makroalg Türlerinden Elde Edilen Makro ve İz Element Konsantrasyonları (mg/kg, Kuru Ağırlık)

	<i>J.</i> <i>rubens</i>	<i>P.</i> <i>capillacea</i>	<i>U.</i> <i>intestinalis</i>	<i>H.</i> <i>scoparia</i>	<i>E.</i> <i>elongata</i>	<i>H.</i> <i>incurva</i>	
MAKRO ELEMENT	Ca	258805	263705	45558	113399	113147	176864
	K	3988	4866	2001	18944	37218	11339
	Mg	25202	21225	13512	17902	2513	15286
	Na	5855	3309	1408	37083	3615	3573
	P	229.7	387.38	436.523	386.035	1440.8	338.056
İZ ELEMENT	Cd	<0.01	<0.01	0.8009	0.8025	<0.01	0.6747
	Co	0.9225	<0.01	<0.01	0.804	1.3554	1.3495
	Cr	5.5350	1.386	1.6019	6.8539	2.71094	5.8448
	Fe	794.28	223.839	342.811	5101.9	770.5862	6256.4
	Mo	0.9225	<0.01	<0.01	<0.01	0.6777	0.6747
	Ni	13.837	1.386	2.4028	19.19261	13.554	18.8933
	Zn	83.025	31.878	97.71726	17.6565	48.797	37.7867

U. intestinalis, *H. scoparia* ve *E. elongata* alg türlerinde Mo ölçülebilir limit değerlerinin altında kalmıştır. *U. intestinalis*, *P. capillacea* ve *H. incurva*, *E. elongata* alg türlerinde Cd ölçülebilir limit değerlerinin altında kalmışken. *U. intestinalis* ve *H. scoparia* alg türlerinde Co ölçülebilir limit değerlerinin altında kalmıştır.

Tablo 3. Makroalg Türlerinin Parametreler Arasındaki İlişkileri Gösteren Pearson Corelasyon Index Tablosu

	Ca	Cd	Co	Cr	Fe	K	Mg	Mo	Na	Ni	P	Zn
Ca	1											
Cd	-.328	1										
Co	.665	-.791	1									
Cr	-.196	.221	.168	1								
Fe	-.372	.881*	-.897*	-.176	1							
K	-.667	-.189	-.050	.434	-.356	1						
Mg	.016	.654	-.376	.103	.404	-.100	1					
Mo	.110	.104	.302	.645	-.339	.330	.616	1				
Na	-.112	.139	.031	.523	-.269	.615	.527	.785	1			
Ni	.359	.239	-.058	-.360	.204	-.461	.766	.360	.062	1		
P	-.031	.466	-.088	.526	.053	.229	.866*	.910*	.785	.505	1	
Zn	-.202	-.422	.045	-.561	-.086	-.036	-.273	-.351	-.577	.228	-.422	1

* korelasyon 0,05 seviyesinde önemli ($p < 0,05$)

Alg örneklerinin elementlerinin birikim sıralarına bakıldığında ilk sıraları makro elementleri aldığı tespit edilmiştir. Her alg örneğinde en fazla bulunan element Ca olmuştur. Fe elementi bütün alg türlerinde makro elementlerden sonra en fazla bulunan iz element olmuştur.

ICP-OES analizi sonucunda alg türlerinde belirlenen parametrelerin ilişkilerini ve korelasyonlarını göstermek için uygulanan Pearson Korelasyon İndeksi analizi sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Makro ve iz elementler arasında uygulanan PCA analizine göre birbirleriyle olan ilişkileri

belirlenmiştir. Bu ilişkiler Tablo 3'te Pearson Corelasyon Index analizine göre $p < 0.05$ ve $p < 0.01$ önem düzeylerine göre makro ile iz elementlerin birbirleriyle pozitif veya negatif ilişkileri ve bu ilişkilerin önem düzeyleri görülmektedir. Veriler arası ilişkilerin daha güvenilir bir biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla tespit edilen sonuçların hepsi kullanılmıştır. İstatistikî olarak 0.70 üzerinde olan ilişkiler güçlü olarak değerlendirilir [20].

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Çalışmamızda en yüksek K seviyesi *E. elongata* türünde (1440 mg/kg; Tablo 2), en düşük K seviyesi ise *J. rubens* türünde (3988 mg/kg; Tablo 2) tespit edilmiştir. Hadjkacem ve ark. [12] yaptıkları çalışmada *H. scoparia* türünde 15689 mg/kg Farzanah ve ark. [21] çalışmasında *U. intestinalis* türünde 7947 mg/kg bulmuşlardır. Çalışmamızda elde edilen verilerin bu çalışmalar ile benzer olduğu görülmüştür.

Çalışmamızda en yüksek P seviyesi *E. elongata* türünde (1440 mg/kg; Tablo 2), en düşük P seviyesi *J. rubens* türünde (229,7 mg/kg; Tablo 2) tespit edilmiştir. Aşıkutlu ve Okudan, [18] çalışmasında *C. foeniculacea* ve *G. montagnei* türlerinde sırasıyla 316,8 mg/kg, 370,3 mg/kg bulmuşlardır.

Bütün alg türlerinde en fazla bulunan makro element Ca olmuştur. Çalışmamızda en yüksek Ca seviyesi *P. capillacea* türünde (263705 mg/kg; Tablo 2), en düşük Ca seviyesi *U. intestinalis* türünde (45558 mg/kg; Tablo 2) belirlenmiştir. Kisten ve ark. [22] en yüksek Ca seviyesinin *J. rubens* türünde 70238 mg/kg, çalışmamızda elde edilen verilerin bu çalışma ile benzer olduğu görülmüştür. Hadjkacem ve ark. yaptıkları çalışmada *H. scoparia* türünde 19919 mg/kg bulmuşlardır. Çalışmamızda elde edilen veriler bu çalışmada elde edilen verilerden daha yüksek bulunmuştur.

Çalışmamızda en yüksek Na seviyesi *H. scoparia* türünde (37083 mg/kg; Tablo 2), en düşük Na seviyesi *U. intestinalis* türünde (1408 mg/kg; Tablo 2) bulunmuştur. Hadjkacem ve ark. [12] yaptıkları çalışmada *H. scoparia* türünde 10350 mg/kg, Farzanah ve ark. [21] çalışmasında *U. intestinalis* türünde 756 mg/kg bulmuşlardır. Elde edilen veriler, bu çalışmalardan elde edilen verilere göre daha yüksek bulunmuştur.

Çalışmamızda en yüksek Mg seviyesi *J. rubens* türünde (25202 mg/kg; Tablo 2), en düşük Mg seviyesi *E. elongata* türünde (2513 mg/kg; Tablo 2) bulunmuştur. Kisten ve ark. [22] çalışmalarında Mg seviyesinin *J. rubens* türünde 35024 mg/kg ve *E. elongata* türünde 18195 mg/kg bulunmuştur. Hadjkacem ve ark. [12] (2022) yaptıkları çalışmada *H. scoparia* türünde 8137 mg/kg, Farzanah ve ark. [21] çalışmasında *U. intestinalis* türünde 3076 mg/kg bulmuşlardır. Çalışmamızda elde edilen veriler bu çalışmalardan elde edilen verilerden düşük bulunmuştur.

Çalışmamızda en yüksek Ni seviyesi *H. scoparia* türünde (19,192 mg/kg; Tablo 2), en düşük Ni seviyesi *P. capillacea* türünde (1,386 mg/kg; Tablo 2) bulunmuştur. Koçbaş ve ark. [23] çalışmasında *U. intestinalis* türünde Ni değerini 8,19 mg/kg, El-Mahrouk ve ark. [24] çalışmasında *U. sp.* türlerinde Ni değerlerini 24,6-33,8 mg/kg bulunmuştur. Ali ve ark. [25] yaptıkları çalışmasında *J. rubens* türünde Ni değerini 4,05-7,43 mg/kg arasında bulunmuşlardır. Elde ettiğimiz verilerin, bu çalışmalarla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Çalışmamızda en yüksek Zn seviyesi *U. intestinalis* türünde (97,717 mg/kg; Tablo 2), en düşük Zn seviyesi *H. scoparia* türünde (17,656 mg/kg; Tablo 2) bulunmuştur. Koçbaş ve ark. [23] çalışmasında *U. intestinalis* türünde Zn değerini 72,04 mg/kg, Khaled ve ark. [26] çalışmasında *J. rubens türünde* 54,4 mg/kg, Squadrone ve ark. [27] çalışmasında *H. scoparia* türünde 25,6 mg/kg, Shams El-Din ve ark. [28] çalışmasında *P. capillacea* türünde 102,4 mg/kg bulmuşlardır. Çalışmamızda elde edilen verilerin bu çalışmalar ile benzer olduğu görülmüştür. Farzanah ve ark. [21] çalışmasında *U. intestinalis* türünde 5,01 mg/kg, Ali ve ark. [25] yaptıkları çalışmasında *J. rubens* türünde 5,8 mg/kg bulunmuştur.

Çalışmamızda elde edilen veriler bu çalışmalardan elden edilen verilerden yüksek bulunmuştur.

Çalışmamızda en yüksek Cr seviyesi *H. scoparia* türünde (6,8539 mg/kg; Tablo 2), en düşük Cr seviyesi *P. capillacea* türünde (1,386 mg/kg; Tablo 2) bulunmuştur. Ali ve ark. [25] yaptıkları çalışmada *J. rubens* türünde Cr değeri 11,71 mg/kg, Farzanah ve ark. [21] çalışmasında *U. intestinalis* türünde 2,26 mg/kg, Squadrone ve ark. [27] çalışmasında *H. scoparia* türünde 7,4 mg/kg bulmuşlardır. Çalışmamızda elde edilen verilerin bu çalışmalar ile benzer olduğu görülmüştür.

Çalışmamızda en yüksek Fe seviyesi *H. incurva* türünde (6256,4 mg/kg; Tablo 2), en düşük Fe seviyesi *P. capillacea* (223,839 mg/kg; Tablo 2) türünde tespit edilmiştir. Koçbaş ve ark. [23] çalışmasında *E. elongata* Fe değerini 2297 mg/kg, Shams El-Din ve ark. [28] çalışmasında *P. capillacea* türünde 234 mg/kg, Squadrone ve ark. [27] çalışmasında *H. incurva* türünde 1863 mg/kg ve Hadjkacem ve ark. [12] yaptıkları çalışmada *H. scoparia* türünde 3946 mg/kg bulmuşlardır. Elde ettiğimiz verilerin, bu çalışmalarla benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

Çalışmamızda en yüksek Cd seviyesi *H. scoparia* türünde (0,8025 mg/kg; Tablo 2), bulunmuştur. *J. rubens*, *P. capillacea* ve *E. elongata* türlerinde Cd ölçülebilir limit değerlerinin altında kalmıştır. *E. elongata* türünde kadmiyum değeri Koçbaş ve ark. [23] çalışmasında <0,01 mg/kg, Dionisio ve ark. [29] çalışmasında 0,34 mg kg olarak bulunmuştur. Elde ettiğimiz verilerin, bu çalışmalarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

Çalışmamızda en yüksek Co seviyesi *E. elongata* türünde (1,3554 mg/kg; Tablo 2), bulunmuştur. *P. capillacea* ve *U. intestinalis* türlerinde Co ölçülebilir limit değerlerinin altında kalmıştır. *U. intestinalis* türünde kadmiyum değeri Koçbaş ve ark. [23] çalışmasında <0,01 mg kg, Shams El-Din ve ark. [28] çalışmasında 1,45 mg/kg olarak bulunmuştur. Çalışmamızda elde edilen verilerin bu çalışmalar ile benzer olduğu görülmüştür.

Çalışmamızda en yüksek Mo seviyesi *E. elongata* türünde (0,6777 mg/kg; Tablo 2.), bulunmuştur. *P. capillacea*, *H. scoparia* ve *U. intestinalis* türlerinde Mo ölçülebilir limit değerlerinin altında kalmıştır. Ak ve ark. [30] yaptıkları çalışmada Mo değerini 0,18 mg/kg bulunmuştur. Elde ettiğimiz verilerin, bu çalışmalarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

Elde ettiğimiz bu sonuçlara göre, alglerin yüksek absorban yeteneğine sahip olduğu söylenebilir ve ağır metal giderimi çalışmalarında kullanılabilecekleri öngörülebilir. Yapılan çalışmaların diğer yıllarda devam ettirilmesi, Akdeniz sahil bölgesinin ağır metal kirliliği hakkında daha detaylı bilgilerin oluşmasında katkı sağlayacağını düşünmekteyiz. Bu bağlamda, insan sağlığını negatif yönde etkileyen ağır metal kirliliğinin turizm potansiyeli yüksek olan Akdeniz sahil şeridinde sürekli olarak izlenmesi ve gerekli tedbirlerin bir an önce alınarak uygulamaya konulması kaçınılmaz bir sonuçtur.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

N.E.G.: Fikir/Kavram (Conceptualization), Veri Toplama Ve/Veya İşleme (Data Curation), Analiz Ve/Veya Yorum (Formal Analysis), Literatür Taraması (Investigation) Yazı Yazan (Writing - Original Draft), **H.B.K.:** Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım Ve Dizayn (Methodology), Analiz Ve/Veya Yorum (Formal Analysis) Literatür Taraması (Investigation) Yazı Yazan (Writing - Original Draft), **E.Ş. O.:** Denetleme/Danışmanlık (Supervision) Malzemeler (Resources) Veri Toplama Ve/Veya İşleme (Data Curation), Yazı Yazan (Writing - Original Draft) Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing), **C.A.:** Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Analiz Ve/Veya Yorum (Formal Analysis) Yazı Yazan (Writing - Original Draft) Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. Özay, R. Mammadov, Ağır metaller ve süs bitkilerinin fitoremediasyonda kullanılabilirliği, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 15 (2013), 68-77.
- [2] K.R. V Bandara, P.M. Manage, Heavy Metal Contamination in the Coastal Environment and Trace Level Identification, içinde: M. Mancuso, M.H.H. Abbas, T. Bottari, A.A. Abdelhafez (Ed.), *Marine Pollution Recent Developments*, IntechOpen, (2022), ss. 1-15. doi:10.5772/intechopen.106653
- [3] G.M. Cragg, D.J. Newman, Natural products: A continuing source of novel drug leads, *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*. 1830 (2013), 3670-3695. doi:10.1016/j.bbagen.2013.02.008
- [4] H.B. Keskinaya, E. Deveci, E. Güneş, E.Ş. Okudan, C. Akköz, N.E. Gümüş, S. Karakurt, Chemical Composition, In Vitro Antimicrobial and Antioxidant Activities of Marine Macroalgae *Codium fragile* (Suringar) Hariot, *Commagene Journal of Biology*. 6 (2022), 94-104. doi:10.31594/commagene.1084336
- [5] A. Özer, G. Akkaya, M. Turabik, Biosorption of Acid Red 274 (AR 274) on *Enteromorpha prolifera* in a batch system, *Journal of Hazardous Materials*. 126 (2005), 119-127. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.06.018
- [6] S.S. Yamaç, Ereğli/Konya Bölgesindeki Evapotranspirasyon Verilerinin İncelenmesi Tarım Uydu Arazilerinin Görüntüleriyle, *Ereğli Tarım Bilimleri Dergisi*. 3 (2023), 8-15
- [7] Y. Doğan, F.; Keleş, Ortaokul ve Lise Öğrencilerinde Çevre Farkındalığı ve Çevre Davranışı, Necmettin Erbakan Üniversitesi Ereğli Eğitim Fakültesi Dergisi, 2 (2020), 80-90.
- [8] P. Fettahloğlu, Algılanan Çevresel Sorunların Çevre Okuryazarlık Düzeyine Göre Analizi, *Mersin Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*. 14 (2018), 404-425. doi:10.17860/mersinefd.400607
- [9] S. Akçay, H. Şengül, A Study on Environmental Literacy of Middle School Students, *Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Dergisi*. 5 (2023), 139-169. doi:10.38151/akef.2023.48
- [10] B. Gümüş, A. Buluş, Uluslararası çevre sorunlar ve William Nordhaus' un çevre ekonomisine katkıları, *Alanya Akademik Bakış*. 4 (2020), 1015-1031. doi:10.29023/alanyaakademik.686110
- [11] M. Suutari, E. Leskinen, K. Fagerstedt, J. Kuparinen, P. Kuuppo, J. Blomster, Macroalgae in biofuel production, *Phycological Research*. 63 (2015), 1-18. doi:10.1111/pre.12078
- [12] F. Hadjkacem, G. Pierre, G. Christophe, J. Elleuch, I. Fendri, Z. Boual, M.D.O. El Hadj, Z. El Alaoui-Talibi, C. El Modafar, P. Dubessay, C. Delattre, P. Michaud, S. Abdelkafi, Bioconversion of the Brown Tunisian Seaweed *Halopteris scoparia*: Application to Energy, *Energies*. 15 (2022), 1-16. doi:10.3390/en15124342
- [13] A. Szeląg-Sikora, M. Niemiec, J. Sikora, Assessment of the content of magnesium, potassium, phosphorus and calcium in water and algae from the black sea in selected bays near Sevastopol, *Journal of Elementology*. 21 (2016), 915-926. doi:10.5601/jelem.2015.20.4.969
- [14] M.T. Alp, O. Ozbay, M.A. Sungur, Determination of heavy metal levels in sediment and macroalgae (*Ulva Sp.* and *Enteromorpha Sp.*) on the Mersin coast, *Ekoloji*. (2012), 47-55. doi:10.5053/ekoloji.2011.827
- [15] H. B. Keskinaya, N. E. Gümüş, B. Aşikkutlu, C. Akköz, E. Ş. Okudan, S. Karakurt, Macro and Trace Element Levels of Green Algae *Codium fragile* ((Suringar Suringar) Hariot 1889 From Dardanelles (Çanakkale / Turkey), *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*. 6 (2020), 55-61.
- [16] A. Bat, L., Arici, E., Öztekin, Threats to quality in the coasts of the Black Sea: heavy metal pollution of seawater, sediment, macro-algae and seagrass, *Spatial Modeling and Assessment of Environmental Contaminants: Risk Assessment and Remediation*, (2021), 289-325. doi:10.1007/978-3-030-63422-3_4

- [17] M.E. Akiner, The Problem of Environmental Pollution in the Mediterranean Sea Along the Coast of Turkey, *Journal of Engineering Studies and Research*. 26 (2020), 7-14.
- [18] B. Aşıkkutlu, E.Ş. Okudan, Macro and Trace Element Levels of Macroalgae *Cystoseira foeniculacea* ve *Gongolaria montagnei* Species from Mediterranean Region (Antalya/ Turkey), *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*. 6 (2021), 757-764. doi:10.35229/jaes.950591
- [19] G.G. MD Guiry, AlgaeBase, *World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway*. (2023) <http://www.algaebase.org> (09.08.2024)
- [20] B. Yılmaz Öztürk, C. Akköz, Investigation of water quality of Apa dam lake (Çumra -Konya) and according to the evaluation of PCA Selçuk University, Science Faculty, Department of Biology, Konya, Turkey, 2 (2014), 136-147.
- [21] R. Farzanah, M. Clausen, E. Arnspang, J. Schmidt, J.-R. Bastidas-Oyanedel, Feasibility of United Arab Emirates Native Seaweed *Ulva intestinalis* as a Food Source: Study of Nutritional and Mineral Compositions, *Phycology*. 2 (2022), 120-131. doi:10.3390/phycolgy2010008
- [22] K. Kisten, R. Moodley, S.B. Jonnalagadda, Elemental Analysis and Nutritional Value of Seaweed from the East Coast of KwaZulu-Natal, South Africa, *Analytical Letters*. 50 (2017), 580-590. doi:10.1080/00032719.2016.1182545
- [23] F. Koçbaş, S. Türk Çulha, A. Gündoğdu, N. Türkçü, Comparison of heavy metal concentrations in marine macroalgae of the Northern Aegean Sea, Türkiye, *Eurasian Journal of Medical and Biological Sciences*. 3 (2023), 23-33.
- [24] M.E. El-Mahrouk, Y.H. Dewir, Y.M. Hafez, A. El-Banna, F.S. Moghanm, H. El-Ramady, Q. Mahmood, F. Elbehiry, E.C. Brevik, Assessment of Bioaccumulation of Heavy Metals and Their Ecological Risk in Sea Lettuce (*Ulva* spp.) along the Coast Alexandria, Egypt: Implications for Sustainable Management, *Sustainability (Switzerland)*. 15 (2023), 1-22. doi:10.3390/su15054404
- [25] A.Y.A. Ali, A.M. Idris, M.A.H. Eltayeb, A.A. El-Zahhar, I.M. Ashraf, Bioaccumulation and health risk assessment of toxic metals in red algae in Sudanese Red Sea coast, *Toxin Reviews*. 40 (2021), 1327-1337. doi:10.1080/15569543.2019.1697886
- [26] A. Khaled, A. Hessein, A.M. Abdel-Halim, F.M. Morsy, Distribution of heavy metals in seaweeds collected along marsa-matrouh beaches, Egyptian mediterranean sea, *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 40 (2014), 363-371. doi:10.1016/j.ejar.2014.11.007
- [27] S. Squadrone, P. Brizio, M. Battuello, N. Nurra, R.M. Sartor, A. Riva, M. Staiti, A. Benedetto, D. Pessani, M.C. Abete, Trace metal occurrence in Mediterranean seaweeds, *Environmental Science and Pollution Research*. 25 (2018), 9708-9721. doi:10.1007/s11356-018-1280-3
- [28] N.G. Shams El-Din, L.I. Mohamedein, K.M. El-Moselhy, Seaweeds as bioindicators of heavy metals off a hot spot area on the Egyptian Mediterranean Coast during 2008-2010, *Environmental Monitoring and Assessment*. 186 (2014), 5865-5881. doi:10.1007/s10661-014-3825-3
- [29] M. Dionísio, A. Costa, A. Rodrigues, Heavy metal concentrations in edible barnacles exposed to natural contamination, *Chemosphere*. 91 (2013), 563-570. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.01.006
- [30] İ. Ak, E.C. Çankirilgil, G. Türker, O. Sever, Assessment of light intensity and salinity regimes on the element levels of brown macroalgae, *Treptacantha barbata*: Application of response surface methodology (RSM), *Food Science and Technology (Brazil)*. 41 (2021), 944-952. doi:10.1590/fst.25220

Newton'un Soğuma Yasası Denklemine Kashuri Fundo Dönüşümü ile Analitik Çözümü

Bilge PEKER¹  Fatma Aybike ÇUHA²  Haldun Alpaslan PEKER³ 

¹ Necmettin Erbakan University, Ahmet Keleşoğlu Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Konya, Türkiye

² Selçuk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mathematics, Konya, Türkiye

³ Selçuk University, Faculty of Science, Department of Mathematics, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 09.11.2023

Kabul Tarihi: 24.12.2023

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

İntegral dönüşümü,
Kashuri Fundo dönüşümü,
Newton'un soğuma yasası,
Diferensiyel denklemler.

Geçmişte olduğu gibi günümüzde de fiziksel olayların anlaşılması, doğru bir şekilde yorumlanabilmesi ve modellenmesi gelişmiş matematiksel yöntemlerin kullanılmasını gerektirir. Bu bağlamda, Newton'un soğuma yasası gibi ısı transferi problemlerinin çözümü, integral dönüşümü gibi güçlü matematiksel araçlarla karmaşık hesaplamalara gerek kalmadan, doğru, güvenilir ve kolaylıkla elde edilir. Newton'un soğuma yasası bir cismin sıcaklığının çevresel sıcaklıkla nasıl etkileşime girdiğini ve zaman içinde nasıl değiştiğini diferensiyel denklem modelleriyle ifade eder. Değişkenler ve değişim hızları arasındaki karmaşık ilişkileri ifade eden bu denklemler, fizikçilerin kesin matematiksel modeller formüle etmelerine olanak tanıyarak, fiziksel sistemlerin davranışlarına ilişkin doğru yorumlar yapılmasını sağlarlar. Diferensiyel denklemlerin çözümlerini elde etmeye yönelik hesaplamalar, cebirsel denklemlere ilişkin hesaplamalardan daha karmaşık olabilir. Bundan dolayı, bu denklemlerin çözümlerini elde etmek için farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu makalede, Newton'un soğuma yasasının integral dönüşümlerinin bir çeşidi olan Kashuri Fundo dönüşümü ile çözümünü ve bu yaklaşımın fizik, biyokimya, ekonomi, finans, mühendislik vb. alanlarda yer alan farklı matematiksel modellerin çözümlerine ulaşmada kullanılabilecek etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koyuyoruz.

Analytical Solution of Newton's Law of Cooling Equation via Kashuri Fundo Transform

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 09.11.2023

Accepted: 24.12.2023

Published: 30.04.2024

Keywords:

Integral transform,
Kashuri Fundo transform,
Newton's Law of cooling,
Differential equation.

As in the past, understanding, correctly interpreting and modeling physical phenomena requires the use of advanced mathematical methods. In this context, the solution of heat transfer problems such as Newton's cooling law is obtained accurately, reliably and easily without the need for complex calculations with powerful mathematical tools such as integral transform. Newton's law of cooling expresses how the temperature of a body interacts with the environmental temperature and changes over time by differential equation models. These equations, expressing the complex relationships between variables and rates of change, provides accurate interpretations of the behavior of physical systems by allowing physicist formulating precise mathematical models. Calculations to obtain solutions of differential equations can be more complex than calculations for algebraic equations. Therefore, different methods have been used to get the solutions of these equations. In this article, we present the solution of Newton's cooling law with Kashuri Fundo transformation, which is a type of integral transformations, and that this approach is an effective and reliable method that can be used to reach solutions of different mathematical models in the fields of physics, biochemistry, economics, finance, engineering, etc.

To cite this article:

Peker, B.; Çuha, F.A. & Peker, H.A. (2024). Analytical solution of Newton's Law of cooling equation via Kashuri Fundo transform, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 10-20. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.29>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Haldun Alpaslan Peker, pekera@gmail.com



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

INTRODUCTION

Every event that takes place in the universe has a mathematics. Scientists reveal the mathematics of the rules behind the events using certain models [1]. Thanks to these models, the events taking place in the universe can be understood and interpreted correctly.

Since most of the events in the universe involve change, differential equations are often used to model these events. Because mathematically, rates of change are defined by derivatives, and since differential equations are equations containing derivatives of one variable with respect to another variable, they provide us with great convenience in understanding and interpreting change.

Differential equations are used to model important events in many different fields such as population growth of species, change in return on our investments, radioactive decay, interest problems, cancer growth and spread of diseases in medicine, finding optimum investment strategies in economics, cooling and heating problems in physics, and many more [2]. Differential equations are important for accurately expressing the foundation of modern physics because they play an important role in understanding and interpreting the complex rules of the natural world. They provide mathematical language for expressing and interpreting the fundamental principles underlying physical phenomena that extend from classical mechanics to beyond quantum mechanics. Differential equations enable us to model and interpret complex real-life problems and reveal the fundamental relationships that underlie them.

Newton's law of cooling, which has a very important position in physics, is also modeled by differential equations. This law explains how the temperature change in an object occurs depending on the difference between the temperature of the object and the temperature of the environment in which the object is located. Newton's law of cooling states that a hot body releases heat energy into its environment [3-5]. The amount of this energy emitted depends on the temperature difference between the object placed in the environment and the environment. While this energy transfer is taking place, as the temperature difference decreases, the energy transfer decreases and eventually the hot body equalizes with the ambient temperature [3-5]. Newton's law of cooling is generally modeled by the linear ordinary differential equation [3]

$$\frac{dT(t)}{dt} = -C(T(t) - T_e) \quad (1)$$

with the initial condition

$$T(t_0) = T_0$$

where T is the temperature of the substance, T_e is the constant temperature of the environment, T_0 is the initial temperature of the substance at time t_0 and C is the proportionality constant, known as convective heat transfer coefficient. This law is used in many different application areas. For example, in engineering, it is the basis for temperature control and heat transfer issues. In addition to this, we encounter this law in our daily lives, for example, in matters such as thermal insulation, air conditioning systems and energy efficiency in our homes and vehicles. It also helps us understand how the temperatures of stars and planets change in astronomy and meteorology. As a result, Newton's law of cooling is a valuable tool for scientists in the development of modern technology, as it forms the basis of many applications related to energy transfer and temperature control.

The variety of uses of differential equations and the modeling of important phenomena in physics make it important to reach the solutions of such equations. In the literature, there are many

methods that can be used to reach solutions of differential equations [6-9]. In this study, we are looking for a solution to Newton's law of cooling, which has a very important place in physics, by using Kashuri Fundo transform [10].

The basis of the Kashuri Fundo transform is the logic of expressing some properties of this function in a more easily analyzable form by taking a certain transformation of a function, as in other integral transformations. They often transform complex differential equations or functions into simpler mathematical operations, making the solution of these equations or the analysis of functions easier [10]. Since the equations obtained as a result of the transformation usually have a more standardized and easier to understand form, the analytical or numerical solutions of the equations become easier and more general. There are many different studies in the literature that reveal the accuracy of these statements [11-21]. There are many studies that show that it gives effective results when used by blending with different methods to reach solutions of nonlinear and fractional differential equations [22-32]. In this study, we demonstrate that the Kashuri Fundo transform, based on Newton's cooling law, which is modeled with first-order differential equations, is an effective, reliable and time-saving method for reaching solutions of first-order differential equations.

MATERIALS AND METHODS

Kashuri Fundo Transform

Definition 1. [10] We consider functions in the set F defined as

$$F = \left\{ f(x) \mid \exists M, m_1, m_2 > 0 \text{ such that } |f(x)| \leq M e^{\frac{|x|}{m_1}}, \text{ if } x \in (-1)^i \times [0, \infty) \right\}$$

For a function in the set defined above, M must be finite. m_1, m_2 may be finite or infinite.

Definition 2. [10] Kashuri Fundo transform defined on the set F and denoted by $K(.)$ is defined as

$$K[f(x)](v) = A(v) = \frac{1}{v} \int_0^{\infty} e^{\frac{-x}{v^2}} f(x) dx, \quad x \geq 0, \quad -m_1 < v < m_2$$

Inverse Kashuri Fundo transform is expressed as: $K^{-1}[A(v)] = f(x), \quad x \geq 0.$

Theorem 1 (Sufficient Conditions for Existence). [10] If $f(x)$ has exponential order $\frac{1}{k^2}$ and is piecewise continuous on $[0, \infty)$, then $K[f(x)](v)$ exists for $|v| < k$.

Theorem 2 (Linearity Property). [10] Let the Kashuri Fundo transforms of $f(x)$ and $g(x)$ exist and c_1, c_2 are scalar. Then

$$K[(c_1 f \pm c_2 g)(x)] = c_1 K[f(x)] \pm c_2 K[g(x)]$$

Theorem 3 (Transformation of the Derivatives). [10] Let's assume that the Kashuri Fundo transform of $f(x)$, denoted by $A(v)$, exists. Then

$$K[f^{(n)}(x)] = \frac{A(v)}{v^{2n}} - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(0)}{v^{2(n-k)-1}} \tag{2}$$

Table 1. Kashuri Fundo Transform of Some Special Functions [10,27]

$f(x)$	$A(v)$
1	v
x	v^3
x^n	$n!v^{2n+1}$
e^{cx}	$\frac{v}{1 - cv^2}$
$\sin(cx)$	$\frac{cv^3}{1 + c^2v^4}$
$\cos(cx)$	$\frac{1 + c^2v^4}{cv^3}$
$\sinh(cx)$	$\frac{1 - c^2v^4}{cv^3}$
$\cosh(cx)$	$\frac{1 + c^2v^4}{1 - c^2v^4}$
x^α	$\Gamma(1 + \alpha)v^{2\alpha + 1}$

APPLICATION

Kashuri Fundo Transform of Newton’s Law of Cooling

In this section, we will apply Kashuri Fundo transform to Newton's law of cooling equation and examine the effectiveness of this method through some numerical applications.

First, taking the Kashuri Fundo transform of the equation (1), we obtain

$$K \left[\frac{dT(t)}{dt} \right] = K [-C(T(t) - T_e)] \tag{3}$$

Now, rearranging the equation (3) according to the equation (2) and substituting the value in the initial condition into this equation, we get

$$\frac{A(v)}{v^2} - \frac{T_0}{v} = -C[A(v) - T_e v] \tag{4}$$

where $A(v) = K [T(t)]$.

If we make the equation (4) suitable for applying the inverse Kashuri Fundo transform, we get

$$A(v) = T_e v - T_e \frac{v}{1 + cv^2} + T_0 \frac{1}{1 + cv^2} \tag{5}$$

Finally, applying the inverse Kashuri Fundo transform to the equation (5) using table 1, we will find the solution of Newton's law of cooling equation as

$$T(t) = T_e + (T_0 - T_e)e^{-ct} .$$

Application 1. [33] A hot milk with initial temperature $115^\circ C$ is kept in an environment with temperature $35^\circ C$. Since the rate of temperature change is $20^\circ C$ per/min, how long will it take for this milk to cool down to temperature $40^\circ C$?

Assuming that milk obeys Newton’s law of cooling, we arrange the equation (1) according to the values given in the question as

$$\frac{dT(t)}{dt} = -C(T - 35) \quad (6)$$

with the initial conditions

$$T(0) = 115, \quad T'(0) = -20 \quad (7)$$

First, using the initial conditions expressed in (7) in the equation (6), we find the value of C as

$$\begin{aligned} -20 &= -C(115 - 35) \\ C &= 0.25 \end{aligned} \quad (8)$$

Substituting this C value we found in the equation (6), we get

$$\frac{dT(t)}{dt} = -0.25(T - 35) \quad (9)$$

Now, applying the transform to both sides of the equation (9), we obtain

$$K \left[\frac{dT(t)}{dt} \right] = -0.25K [T - 35] \quad (10)$$

Rearranging the equation (10) according to the equation (2) and table 1, we get

$$\frac{A(v)}{v^2} - \frac{115}{v} = -0.25[A(v) - 35v] \quad (11)$$

Rearranging this equation, we get

$$A(v) = \frac{115v}{1 + 0.25v^2} + 35v - \frac{35v}{1 + 0.25v^2} \quad (12)$$

Finally, applying the inverse Kashuri Fundo transform to the equation (12), we find the solution of equation (6) as

$$T(t) = 80e^{-0.25t} - 35 \quad (13)$$

Now we can find out how long it will take for the milk to cool down to $40^\circ C$ based on our solution. For this, we organize the solution as

$$40 = 35 + 80e^{-0.25t} \quad (14)$$

If we solve this equation, we find the time we are looking for as

$$\begin{aligned} 80e^{-0.25t} &= 5 \\ e^{0.25t} &= 16 \\ 0.25t &= \ln 16 \\ t &= 11.090354889 \end{aligned}$$

This result is in good agreement with the results obtained by other methods [33-35].

Application 2. [33] The heated iron with an initial temperature of $50^\circ C$ is kept in an environment with temperature of $27^\circ C$. Since the rate of temperature change is $3^\circ C$ per/min, how long will it take for this iron to cool down to temperature $36^\circ C$?

Assuming that iron obeys Newton's law of cooling, we arrange the equation (1) according to the values given in the question as

$$\frac{dT(t)}{dt} = -C(T - 27) \quad (15)$$

with the initial conditions

$$T(0) = 50, \quad T'(0) = -3 \quad (16)$$

First, using the initial conditions expressed in (16) in the equation (15), we find the value of C as

$$\begin{aligned} -3 &= -C(50 - 27) \\ C &= 0.13 \end{aligned} \quad (17)$$

Substituting this C value we found in the equation (15), we get

$$\frac{dT(t)}{dt} = -0.13(T - 27) \quad (18)$$

Now, applying the Kashuri Fundo transform to both sides of the equation (18), we obtain

$$K \left[\frac{dT(t)}{dt} \right] = -0.13K [T - 27] \quad (19)$$

Rearranging the equation (19) according to the equation (2) and table 1, we get

$$\frac{A(v)}{v^2} - \frac{50}{v} = -0.13[A(v) - 27v] \quad (20)$$

Rearranging this equation, we get

$$A(v) = \frac{50v}{1 + 0.13v^2} + 27v - \frac{27v}{1 + 0.13v^2} \quad (21)$$

Finally, applying the inverse Kashuri Fundo transform to the equation (21), we find the solution of equation (15) as

$$T(t) = 23e^{-0.13t} + 27 \quad (22)$$

Now we can find out how long it will take for the milk to cool down to $36^\circ C$ based on our solution. For this, we organize the solution as

$$36 = 27 + 23e^{-0.13t} \quad (23)$$

If we solve this equation, we find the time we are looking for as

$$\begin{aligned} 23e^{-0.13t} &= 9 \\ e^{0.13t} &= \frac{23}{9} \\ 0.13t &= \ln \frac{23}{9} \\ t &= 7.2175 \end{aligned}$$

This result coincides with the ones found by other methods [33-35].

Application 3. [36] While the ambient temperature is $20^{\circ}C$ the temperature of the water drops from $100^{\circ}C$ to $80^{\circ}C$ in 20 minutes. What will be the temperature after 30 minutes and how long will it take for this water to cool to $45^{\circ}C$?

Assuming that water obeys Newton's law of cooling, we arrange the equation (1) according to the values given in the question as

$$\frac{dT(t)}{dt} = -C(T - 20) \quad (24)$$

with the initial conditions

$$T(0) = 100, \quad T(20) = 80 \quad (25)$$

First, applying the Kashuri Fundo transform to both sides of the equation (24), we obtain

$$K \left[\frac{dT(t)}{dt} \right] = -CK [T - 20] \quad (26)$$

Rearranging the equation (26) according to the equation (2) and table 1, we get

$$\frac{A(v)}{v^2} - \frac{100}{v} = -C [A(v) - 20v] \quad (27)$$

Rearranging this equation, we get

$$A(v) = \frac{80v}{1 + Cv^2} + 20v \quad (28)$$

Finally, applying the inverse Kashuri Fundo transform to the equation (28), we find the solution of equation (24) as

$$T(t) = 80e^{-Ct} + 20 \quad (29)$$

Now let's find the value of C . If we use $T(20) = 80^{\circ}$ in the equation (29), we get

$$\begin{aligned} 80 &= 20 + 80e^{-20C} \\ e^{-c} &= \left(\frac{3}{4} \right)^{\frac{1}{20}} \end{aligned} \quad (30)$$

Using the equation (30) to find $T(30)$, we obtain

$$\begin{aligned} T(30) &= 20 + 80e^{-30c} \\ T(30) &= 20 + 80 \left(\frac{3}{4} \right)^{\frac{3}{2}} = 71.96^{\circ}C \end{aligned} \quad (31)$$

Now we can find out how long it will take for the water to cool down to $45^{\circ}C$ based on our solution. For this, we organize the solution as

$$45 = 20 + 80(e^{-C})^t$$
$$\left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{t}{20}} = \frac{25}{80}$$
$$t = 80.8636283723$$

This result is in good agreement with the result obtained by other method [36].

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Our aim in carrying out this study is to show that Kashuri Fundo integral transform is an effective, reliable, time-saving method that does not require complex calculations in reaching solutions of first-order ordinary differential equations. In order to show, Newton's law of cooling equation, which is modeled by first-order ordinary differential equation, was used in the application of the transform. After applying Kashuri Fundo transform to the differential equation model expressing Newton's law of cooling, reinforcement was made on three different numerical examples to reveal the usefulness of the method. As a result of these applications, it has been concluded that Kashuri Fundo method is an effective, reliable and simple calculation method that can be used in the solutions of differential equations. Based on this result, it can be said that this method can provide convenience to scientists in reaching the solutions of most real-life problems modeled by existing or being developed differential equations.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship Contribution Statement

B.P.: Methodology, Writing - Review & Editing, **F.A.Ç.:** Formal Analysis, Investigation, Methodology, Writing - Original Draft, **H.A.P.:** Supervision, Conceptualization, Investigation, Writing - Review & Editing

REFERENCES

- [1] W.J. Palm, Y.A. Çengel, *Differential Equations for Engineers and Scientists*, McGraw Hill, New York, 2012.
- [2] D.G. Zill, *A First Course in Differential Equations with Modeling Applications*, Cengage Learning, Boston, 2017.
- [3] L.M. Jiji, *Heat Conduction*, Springer-Verlag, Berlin, 2009. doi: 10.1007/978-3-642-01267-9
- [4] R.H.S. Winterton, Newton's law of cooling, *Contemporary Physics*. 40(3) (1999), 205–212. doi: 10.1080/001075199181549
- [5] H.D. Baehr, K. Stephan, *Heat and Mass Transfer*, Springer-Verlag, Berlin, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-20021-2
- [6] L. Debnath, D. Bhatta, *Integral Transforms and Their Applications*, Chapman and Hall/CRC, New York, 2007.
- [7] G. Adomian, *Solving Frontier Problems of Physics: The Decomposition Method*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994.
- [8] H.J. He, Variational iteration method-a kind of non-linear analytical technique: some examples, *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 34(4) (1999), 699–708. doi:10.1016/S0020-7462(98)00048-1
- [9] S.J. Liao, *The Proposed Homotopy Analysis Technique for The Solution of Non-Linear Problems*, Ph.D. thesis, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 1992.
- [10] A. Kashuri, A. Fundo, A new integral transform, *Advances in Theoretical and Applied Mathematics*. 8(1) (2013), 27–43.
- [11] A. Kashuri, A. Fundo, R. Liko, On double new integral transform and double Laplace transform, *European Scientific Journal*. 9(33) (2013), 82–90.
- [12] N. Helmi, M. Kiftiah, B. Prihandono, Penyelesaian persamaan diferensial parsial linear dengan menggunakan metode transformasi Artion-Fundo, *Buletin Ilmiah Matematika Statistika dan Terapannya*. 5(3) (2016), 195–204.
- [13] D.N. Dhange, A new integral transform and its applications in electric circuits and mechanics, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 7 (11) (2020), 80-86.
- [14] N. Dhange, A new integral transform for solution of convolution type Volterra integral equation of first kind, *International Journal of Mathematics Trends and Technology*. 66 (10) (2020), 52-57.
- [15] H.A. Peker, F.A. Çuha, Application of Kashuri Fundo transform to decay problem, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*. 26(3) (2022), 546–551. doi: 10.19113/sdufenbed.1160426
- [16] H.A. Peker, F.A. Çuha, B. Peker, Kashuri Fundo transform for solving chemical reaction models, *International E-Conference On Mathematical And Statistical Sciences: A Selcuk Meeting, ICOMSS-22*, Konya, 2022, 145–150.
- [17] H.A. Peker, F.A. Cuha, B. Peker, Solving steady heat transfer problems via Kashuri Fundo transform, *Thermal Science*. 26(4A) (2022), 3011–3017. doi: 10.2298/TSCI2204011P
- [18] F.A. Cuha, H.A. Peker, Solution of Abel's integral equation by Kashuri Fundo transform, *Thermal Science*. 26(4A) (2022), 3003–3010. doi:10.2298/TSCI2204003C
- [19] H.A. Peker, F.A. Çuha, Application of Kashuri Fundo Transform to Population Growth and Mixing Problem, in: Hemanth D.J., Yiğit T., Köse U., Güvenç U. (Ed.), *Engineering Cyber-Physical Systems and Critical Infrastructures (ECPSCI)*, Springer, 2023: ss. 407-414. doi:10.1007/978-3-031-31956-3

- [20] H.A. Peker, F.A. Çuha, Exact solutions of some basic cardiovascular models by Kashuri Fundo transform, *Journal of New Theory*. 43 (2023), 63-72. doi:10.53570/jnt.1267202
- [21] F.A. Çuha, H.A. Peker, Finding solutions to undamped and damped simple harmonic oscillations via Kashuri Fundo transform, *MANAS Journal of Engineering*. 11(1) (2023), 154-157. doi:10.51354/mjen.1186550
- [22] A. Kashuri, A. Fundo, M. Kreku, M., Mixture of a new integral transform and homotopy perturbation method for solving nonlinear partial differential equations, *Advances in Pure Mathematics*. 3 (2013), 317-323.
- [23] K. Shah, T. Singh, A Solution of the Burger's equation arising in the longitudinal dispersion phenomenon in fluid flow through porous media by mixture of new integral transform and homotopy perturbation method, *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 3 (2015), 24-30.
- [24] K. Shah, T. Singh, The mixture of new integral transform and homotopy perturbation method for solving discontinued problems arising in nanotechnology, *Open Journal of Applied Sciences*. 5 (2015), 688-695.
- [25] K. Shah, T. Singh, B. Kılıçman, Combination of integral and projected differential transform methods for time-fractional gas dynamics equations, *Ain Shams Engineering Journal*, 9 (2018), 1683-1688.
- [26] K.B. Singh, Homotopy perturbation new integral transform method for numeric study of space- and time fractional (N+1)-dimensional heat and wave-like equations, *Waves Wavelets and Fractals*. 4 (2018), 19-36.
- [27] I. Sumiati, Sukono, A.T. Bon, Adomian decomposition method and the new integral transform, *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Harare, 2020, 1882-1887.
- [28] H.A. Peker, F.A. Cuha, Application of Kashuri Fundo transform and homotopy perturbation methods to fractional heat transfer and porous media equations, *Thermal Science*. 26(4A) (2022), 2877-2884. doi:10.2298/TSCI2204877P
- [29] M.D. Johansyah, A.K. Supriatna, E. Rusyaman, J. Saputra, Solving the economic growth acceleration model with memory effects: An application of combined theorem of Adomian decomposition methods and Kashuri-Fundo transformation methods, *Symmetry*. 14(2) (2022), 192.
- [30] H.J. Kadyum, A. Al-Fayadh, Solving Schrodinger equations using Kashuri and Fundo transform decomposition method, *Al-Nahrain Journal of Science*. 25(2) (2022), 25-28.
- [31] H.A. Peker, F.A. Çuha, B. Peker, Kashuri Fundo decomposition method for solving Michaelis-Menten nonlinear biochemical reaction model, *MATCH Communications in Mathematical and in Computer Chemistry*. 90 (2023), 315-332. doi:10.46793/match.90-2.315P
- [32] H.A. Peker, F.A. Çuha, Solving one-dimensional Bratu's problem via Kashuri Fundo decomposition method, *Romanian Journal of Physics*. 68(5/6) (2023), 109.
- [33] D.P. Patil, D.S. Shirsath, V.S. Gangurde, Application of Soham transform in Newtons law of cooling, *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*. 10(6) (2022), 1299-1303.
- [34] D.P. Patil, S.A. Patil, K.J. Patil, Newton's law of cooling by "Emad-Falih transform", *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*. 4(6) (2022), 1515-1519.
- [35] D.P. Patil, J.P. Gangurde, S.N. Wagh, T.P. Bachhav, Applications of the HY transform for Newton's law of cooling, *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*. 9(2) (2022), 740-745.

[36] P. Naresh, Newton's law of cooling-Laplace transform, *Journal of Global Research in Mathematical Archives*. 4(12) (2017), 28-34.

Farklı İklim Bölgelerinde TOKİ Tip Konutlarının Doğal Havalandırma Analizi

Hatice Derya ARSLAN¹  Sümeyye Merve ACAR BİLGİLİ²  Sercan DOĞAN³ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, Türkiye

² Mesken Tasarım, Konya, Türkiye

³ Konya Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 01.11.2023

Kabul Tarihi: 25.12.2023

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Doğal havalandırma,

Enerji etkin tasarım,

Flow simulation,

Pasif iklimlendirme,

Rüzgâr.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgârın doğal havalandırmada iç mekâna olan etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle detaylı bir literatür araştırması yapılarak enerji etkin bina tasarımı ve doğal havalandırma kavramları ve kriterleri ile çalışmaya yönelik kavramsal alt yapı oluşturulmuştur. Çalışmanın devamında doğal havalandırma analizleri için Türkiye genelinde en çok uygulanan TOKİ (Toplu Konut İdaresi)'ye ait 2+1 konut projesi seçilmiş ve ilgili birimlerden gerekli dokümanlara erişilmiştir. Seçilen tip projeye ait yapı modeli hazırlanarak Solidworks programı-Flow Simulation eklentisi yardımıyla beş farklı iklim bölgesinde doğal havalandırma analizleri yapılmıştır. Hazırlanan model simülasyonu sürecinde dış mekânda yer alan yapılar ile oluşan hava akımı etkisi göz ardı edilmiş, iç mekânlardaki hava dolaşımına odaklanılmıştır. Analizler sonucunda tüm iklim bölgelerinde yaşama mekânlarında etkin doğal havalandırma sağlandığı ancak mutfak mekânının doğal havalandırmada yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca sıcak iklim bölgelerinde balkon mekânlarının serinletici etki almadığı ve soğuk iklim bölgesinde ise hâkim rüzgârın yapıya geliş yönüne göre ısıtma yükünü artırdığı gözlemlenmiştir.

Natural Ventilation Analysis of TOKİ Type Houses on Different Climate Regions

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 01.11.2023

Accepted: 25.12.2023

Published: 30.04.2024

Keywords:

Energy efficient design,

Flow simulation,

Natural ventilation,

Passive air conditioning,

Wind.

In this study, it was intended to investigate the effect of wind as a renewable energy source on natural ventilation of interior spaces. In this scope, firstly, a comprehensive literature research was conducted and a conceptual infrastructure was created for the study with energy efficient building design and natural ventilation concepts and criteria. In the continuation of the study, the 2+1 housing project of TOKİ (Mass Housing Development Administration), that is the most implemented throughout Turkey, was selected for natural ventilation analysis and the necessary documents were accessed from the relevant units. The building model of the selected type project was prepared and natural ventilation analyzes were carried out in five different climate zones with the help of the Solidworks program-Flow Simulation add-on. During the prepared model simulation process, the air flow effect caused by the buildings located outdoors was neglected and the focus was on the air circulation in the interior spaces. Finally, At the end of the study, it was determined that effective natural ventilation was provided in living spaces in all climatic regions, but the kitchen space was inadequate in natural ventilation. Additionally, in hot climate regions, balcony spaces do not receive cooling supplements, and in cold climate regions, the prevailing wind increases the heating load depending on the direction of arrival of the building.

To cite this article: Arslan, H.D., Acar Bilgili, S.M. & Doğan, S. (2024). Farklı iklim bölgelerinde TOKİ tip konutlarının doğal havalandırma analizi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 21-39. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.30>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hatice Derya Arslan, deryaarslan@erbakan.edu.tr



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

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nüfus artışı ile hızlı ve seri yapı üretim süreci sonucu tüketilen enerji miktarı artmakta, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı azalmaktadır. Binalarda ihtiyaç duyulan enerji tüketiminin büyük bir kısmı ısıtma-soğutma ve iklimlendirme için gerekli olmaktadır. Binaların iklimlendirmesinde kullanılan enerji korunumu sağlamayan mekanik sistemler ekosisteme olumsuz etkiler yapmakta ve önemli problemlere neden olmaktadır [1-3]. Ekosisteme zarar veren olumsuz etkileri minimize edebilmek için çevreye zarar vermeyen ve yenilenebilir kaynaklardan desteklenen iklimle uyumlu sistem tasarımları yapılmalıdır. Bu noktada binaların iklimlendirmesinde doğal havalandırma sistemlerinin kullanılması enerji tüketimini azaltmak ve ekosistem dengesini korumak için büyük önem arz etmektedir.

Yapıların üretim süreci itibari ile yaşam döngüsü boyunca farklı aşamalarında enerji kullanımları ihtiyaç olmakta ve yapı sektörü enerji kullanımında yüksek bir orana sahip olmaktadır. Buradan hareketle insanın yaşamında temel ihtiyaç olan barınma gereksinmesi ile başlayan ve farklı fonksiyonlar için tasarlanan tüm binaların, sürdürülebilir tasarımı gündeme gelmektedir. 1970'li yıllar itibari ile gündeme gelmeye başlayan ve günümüze kadar gelişen "sürdürülebilir tasarım" yaklaşımında yapılar; sağlıklı, çevre duyarlılığı yüksek, enerji etkin özelliklere sahip olarak üretilmektedir. Enerjinin korunumu, sarfiyatının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması sürdürülebilir tasarım anlayışının temelini oluşturmaktadır. Sürdürülebilir mimari tasarım yaklaşımı "enerji etkin bina tasarım ilkeleri" ile desteklenmektedir [4-7]. Enerji etkin tasarım yaklaşımını, binanın tasarım aşaması ile başlayan uygulama ve kullanım sürecine yönelik düzenlenmesi gerekli dış çevre ve bina düzenlenmesine ilişkin faktörler olarak iki grupta incelemek mümkündür [8]. Dış çevreye ilişkin iklimsel veriler doğrultusunda iklimle uyumlu tasarım yapılması önemlidir. Ayrıca binaya ilişkin iç mekân iklimlendirmesinde gerekli enerjinin verimli ve etkin kullanımı için fiziksel ve yapısal çevrenin verileri dikkate alınmalıdır.

Binaların iklimlendirmesinde pasif tasarım ilkelerine destek veren yenilenebilir kaynak kullanımlı çözümler enerji etkin tasarım için temel amaçtır. Doğal havalandırma; iç ve dış mekân arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan yoğunluk farkları ile rüzgâr basıncı sonucunda oluşmaktadır [9]. Çevre dostu enerji etkin binalar tasarlamak için mekânların iklimlendirmesinde bir alt başlık olan havalandırmada doğal çözümlerden faydalanmak binalarda tasarlanan pencere kapı gibi boşluklardan dış ortamdaki rüzgâr basıncının alınması ile sağlanabilmektedir. Binaların soğutulması için kullanılan enerji yükünü azaltılmasına yardımcı olan doğal havalandırma ile enerji etkin tasarımlar yapılabilmektedir.

Doğal enerji kaynağı olarak rüzgâr enerjisi, yapıların doğal havalandırmasında ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Doğal hava hareketi ile sağlanan doğal havalandırma sürdürülebilir ekonomik kalkınma için büyük önem arz etmektedir. Gelişmiş ülkelerde proje kontrollerinde imar yönetmeliklerine uygunluk haricinde hava akımı ve enerji kullanımı kontrolleri de yapılmaktadır. Yapılan bu kontroller sayesinde mekanik sistemlere olan ihtiyaç azalmakta ve fosil enerji kullanımından tasarruf edilebilmektedir. Düzenlemelerde dikkat edilerek enerji sarfiyatının azaltılmasını basit bir örnek; "ısınan havanın yükselme prensibi" ile oluşan geçici akım yardımıyla mekânların ısıtma ve soğutmasının sağlanması gösterilebilir [10].

Mekânlarda doğal havalandırma etkin tasarımlar için hava akımı prensiplerine dikkat edilerek sistem verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Doğal havalandırma etken tasarımlar için binaların tasarım sürecinde günümüz teknolojik imkânların kullanımı ile modeller üzerinden analizlerin yapılması ve elde edilen verilerin tasarım girdisi olarak kullanımı önem arz etmektedir. Ayrıca cephe tasarımlarında zemine yakın yatay açıklıkların düzenlenmesi ve ılıman iklimlere sahip bölgelerde hava akımını artırıcı prensipler yardımıyla baca ve ventüri etkilerinden

faýdalanılmalıdır. Havanın sirkülasyonu için gerekli prensipler; havanın akış hızı, yönü ve binaya etki eden basınç miktarının çeşitli yöntemlerle değişimi sağlanarak doğal havalandırma sistemleri desteklenmelidir.

Çok eski zamanlardan beri doğal havalandırmayı dikkate alan binalar inşa edilmektedir. Günümüz teknolojisinin ilerlemesine paralel olarak da doğal havalandırma etkin tasarımlar için cephe ve plan çözümleri geliştirilmektedir [11-12]. Ayrıca uygulaması yapılacak binaya ait verilerin bilgisayar ortamına girişlerinin yapılması ve farklı meslek gruplarından uzmanların bir arada çalışması ile enerji etkin tasarım çözümleri de üretilmektedir. Gelişen yazılımlar ile hazırlanan modeller üzerinden uygulama öncesi gerekli analizler yapılarak elde edilen veriler doğrultusunda uygulamaya yönelik alınan kararlar ile enerji korunumuna yönelik düzenlemeler yapılmaktadır. Mekanik sistemlerin harcadığı enerji miktarı ve çevreye verdiği zarar belirlenerek gerekli tedbirlere göre tasarımlar uygulanmaktadır. Yazılımlarda kullanılan farklı hesaplama yöntemleri ve ara yüzler farklı mühendislik dallarına da hizmet vermektedir. Disiplinler arası çalışmalar ile binaların iklimlendirilmesine yönelik pasif tasarım yaklaşımları ile enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Literatürde doğal havalandırma üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle yüksek katlı yapılarda rüzgârın cephedeki basınç üzerine etkisinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır [13-14]. Bir yapının doğal havalandırma etkin tasarım kararlarının belirlenmesi için binanın konumu, formu, cephe tasarımı ele alınarak analiz çalışmaları yapılmaktadır [14-15]. Geleneksel mimaride enerji etkin tasarım kriterlerinin değerlendirildiği bir çalışmada öncelikle doğal havalandırma ve rüzgâr enerjisi konuları ele alınmıştır. Devamında bina uygulamalarında yenilenebilir kaynak kullanımının sürdürülebilir bir dünya için önem arz ettiği fiziksel ve yapı çevre etmenleri üzerinden vurgulanmıştır [14]. Ayrıca rüzgârın yüksek yapılara olan etkisini araştırmak için farklı yapılara ait model çalışmaları üzerinden analizler yapılmıştır. Şanghay Kulesi (Shanghai Tower) gibi yüksek katlı yapılarda strüktür, yer ve form seçimi gibi parametreler ile rüzgâr etkisinin değiştiği görülmüştür [16]. Türkiye’de bulunan binalarda yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinin kullanımı üzerine yapılan bir çalışmada ise, çatı ve cephe üzerinden enerji etkin binalar değerlendirilmiştir [17]. Bunlara ilaveten Türkiye’de ve gelişmiş ülkelerde rüzgâr enerjisinin kullanım alanları ve pasif sistem tasarım yaklaşımlarının yapılarda uygulanmasına ilişkin değerlendirmelerin yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [18-22]. Kent dokusu üzerine Autodesk CFD, Revit ve Flow Design programlarının kullanımı ile yüksek yapılaşma ve rüzgâr ilişkisinin incelendiği çalışmalar da yer almaktadır. Analizlerde binaların yön, form ve çevresindeki yapılaşma oranlarına göre sonuçların farklılaştığı vurgulanmaktadır [23-25]. Enerji etkin tasarım yaklaşımında enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik çalışmalarda, pasif rüzgâr enerji sistemlerine odaklanıldığı dikkat çekmektedir [26-29]. İklimlendirme sistemlerinin çevre kirliliğindeki payının araştırıldığı çalışmalarda ise doğal havalandırmanın geleneksel yapılarda uygulanması örnekler aracılığı ile aktarılmıştır [30-31]. Doğal havalandırmanın sağlandığı mevcut bina sistemleri İstanbul-Beylikdüzü’nde bulunan dört bina üzerinden incelenerek rüzgâr ile olan ilişkileri değerlendirilmiştir [32]. Avlu ve atrium gibi mekânlara özelleşen çalışmalarda rüzgâr etkisinin doğal havalandırmaya katkısı araştırılmıştır [33-36]. Kyoto ve Rio gibi iklimsel değişiklik ile ilgili sözleşmelerin incelendiği çalışmada ise doğal havalandırma sistem çözümlerinin geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır [37]. Çalışmada yüksek yapılarda form ve hâkim rüzgâra göre konumlanmanın birbirini desteklemesi durumunda etkin doğal havalandırmanın sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca dikdörtgen, üçgen gibi köşeli formlara sahip yapılarda köşe noktalarının hâkim rüzgâra göre konumlanmasının üst kotlarda rüzgârın hızını yavaşlattığı görülmüştür. Yapılan çalışma ile yapı sektöründe kullanılan enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik çıkarımlar yapılmıştır.

Yapılan kapsamlı literatür araştırması ile çalışmalarda, rüzgâr enerjisi ve doğal havalandırmaya dair kavramsal bilgilerin aktarıldığı ve konut dışı kullanımlı yapılara odaklanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte mekânların doğal havalandırmasına ilişkin çalışmaların eksikliği gözlemlenmiştir. Literatürde tespit edilen bu boşluktan hareketle, çalışma kapsamında, bir yapının enerji kullanımı gerektirmeden doğal havalandırmasının sağlandığı sistemlerin irdelenmesi ve mekânsal olarak analizleri konu edinilmiştir [8]. Çalışma, doğal havalandırma özelinde iklimlendirmenin sağlanmasına dair pasif sistem stratejileri geliştirilebilmesi açısından önemlidir. Yapılarda doğal havalandırmanın gerekliliği, doğal havalandırma yöntemleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile yapılan analizler çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır. Bu çalışma ile ayrıca pandemi döneminde önemi artan kapalı mekânların doğal havalandırılması için simülasyonlar aracılığı ile öneriler getirmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye genelinde beş farklı iklim bölgesinde TOKİ'nin en çok uyguladığı tip konut projesinin plan ve yerleşimi üzerinden, bina içerisine alınan hava akımının doğal havalandırmaya etkisinin belirlenmesi için analizler yapılmıştır. Elde edilen analiz verileri karşılaştırmalı değerlendirilerek mekânlarda etkin doğal havalandırmaya yönelik sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Doğal Havalandırma Analizleri İçin Seçilen TOKİ Tip Konut Projesi (The TOKİ Type Housing Project Selected for Natural Ventilation Analysis)

Bireylerin en fazla yatırım yaptıkları mülkiyet aracı olan konut, başta barınma ihtiyacını karşılamak ile birlikte birçok açıdan insan yaşamında önemli bir yere sahiptir. Türkiye'de yaşanan hızlı nüfus artışı ile oluşan konut ve kentleşme sorunlarına çözüm olarak seri üretim ve istihdam sağlanması amacıyla, 1981 yılında Toplu Konut ve Kamu Ortaklığı İdaresi Başkanlığı kurulmuştur. Toplu Konut İdaresi Başkanlığının (TOKİ) görevi Türkiye'de hızlı artan konut talebinin planlı bir şekilde karşılanmasıdır [38-42].

Bu makalede TOKİ tarafından tip proje olarak üretilmiş toplu konut projelerinden bir tanesi seçilmiştir. Uygulanan tip projelerde bodrum + zemin + dört normal kat seçilerek çalışmada kat sayısı sınırlandırılmıştır. Ayrıca analiz süresini sınırlandırmak için projedeki konutlar 2+1 olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 1'de zemin ve 1. kat planları verilmiştir. Solidworks programındaki Flow Simulation eklentisi ile yapılan analizlerde, planlar üçüncü boyuta aktarılmış, pencere ve kapı boşlukları tanımlanmıştır. Böylece Türkiye'de beş farklı iklim bölgesi için bina iç ve dış ortamında oluşan rüzgâr hareketi örnek bina üzerinden incelenmiştir. Çalışmada yapıların bölgedeki hâkim rüzgâr ile olan ilişkisi, meydana gelen hava akımının; doğal havalandırmaya etkisi kullanılan programdan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Analizler rüzgâr hızı ve yönüne ait verilerin programa girilmesi ile yapılmıştır. Nem ve basınç ile ilgili veriler çalışma sınırları dışında tutulmuştur. Ayrıca vaziyet planına göre çevrede bulunan yapıların oluşturduğu hava akımı da analize dâhil edilmemiştir.

Çalışmada iklim bölgelerine göre değişen rüzgâr hızı ve yönü Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Solidworks programındaki modelin oluşturulması ve ardından oluşturulan modelin Flow Simulation analiz programına aktarılması devamında analizler yapılmıştır. Çalışmada belirlenen sınır şartlar tanımlanmış ve ağ yapısı oluşturularak seçilen 2+1 konutta meydana gelen hava akımının doğal havalandırmaya olan etkisi irdelenmiştir. Analizlerden elde edilen veriler, rüzgâr hızı ve rüzgârın iç mekândaki hareketine bağlı olarak yorumlanmıştır.

Yapının tasarımında seçilen mimari elemanlar (cephe ve çatı bileşenleri vs.) ile konum ve yönlendirmede iklimle uyumlu kararların alınması ve uygulanması doğrultusunda doğal havalandırma etken tasarımlar yapmak mümkündür [8]. Etkin bir doğal havalandırmada hava akımının hızını ve

çeşidini bilmek son derece önemlidir. Bu açıdan yapının imal edilmeden önce gelişmiş sonlu elemanlar yazılımları ile modellenerek yapıda rüzgârın oluşturduğu etkinin değerlendirilmesi tasarımcı için oldukça önemlidir. Bu açıdan rüzgârın akışını modelleyebilen akışkanlar mekaniği hesaplamaları ile çeşitli analizler yapabilen programların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu programlar genellikle “Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz programları” olarak isimlendirilmektedir. Bu programlarla iki ve üç boyutlu analizler simule edilebilmektedir.



Şekil 1. *Analizlerde Ele Alınan Konut Tipi Zemin ve 1. Kat Planı*

Günümüzde Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) adı verilen bir takım yazılımlarla kütle analiz edilebilmektedir. Böylece ön tasarımda kritik kararlar verilebilmekte ve uzun vadede kullanıcı için oluşabilecek bazı olumsuzlukların da önüne geçilebilmektedir. Elde edilen veriler tasarım aşamasında kullanılarak pasif sistemsel kurgularla enerji etkin tasarımlar yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programından yararlanılarak pasif sistemler ile doğal havalandırma sağlamaya yönelik ilgili analizler yapılmıştır. Doğal hava akışını etkileyen faktörler rüzgârın hızı, hâkim rüzgâr yönü, rüzgâr hızı ve yönündeki günlük ve mevsimsel değişim ve doğal ve yapılı çevredir. Bu çalışmada ise sadece rüzgâr hızı ve yönüne ait veriler analiz kapsamına alınmıştır. Analizlerde binada bulunan pencerelerin hepsi çift kanatlı ve açık kabul edilmiştir. Kullanılan tip projede yatak odalarında 140x120 cm ve 140x130 cm, salonda 250x220 cm, mutfakta 275x 220 cm pencere, balkonda ise 80x220 cm kapı kullanılmıştır.

HAD Analiz Yöntemi (CFD Analysis Method)

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Akışkanlar Mekaniği problemlerin çözümünde günümüzde önemli bir araştırma alanıdır. Akış alanının incelenmesi için akış ile ilgili kurulan denklem kümelerinin (kütle, enerji ve momentum korunumu vs.) çözümlenebilmesi gerekir [43]. Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği oldukça karmaşık olan bu denklemlerin çözümlenmesinde yardımcıdır.

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi projenin tasarım sürecinde yapının iç ve dış mekânında oluşan rüzgâr etkisini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Hava akımının tipi, hızı ve çevre binalarla etkileşimi Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği ile belirlenebilmektedir. Böylece Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği ile mimari tasarımda fiziksel özellikler belirlenebilmektedir. Özellikle yapıya iç ve dış mekânda etki eden yükler, iklimlendirme durumu, aydınlatma, enerjide meydana gelen kazanç ve kayıplar vs. gibi verilere ulaşılabilmektedir. Belirtilen faydalarından dolayı bu çalışmada Solidworks Flow Simulation seçilmiştir. Program ile ilgili kısa bilgi ise aşağıda verilmiştir.

Solidworks Flow Simulation (Solidworks Flow Simulation)

Bir akışkanlar dinamiği programı olan Solidworks Flow Simulation hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Akışkanlar Mekaniği problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Özellikle mimaride projelendirilen bir binanın yakın çevresinde oluşan hava hareketleri, bina ile etkileşen hava akımı ve tipi gibi değerler üzerinden analizler yapılabilmektedir [44]. Flow Simulation, laboratuvar ortamında doğal havalandırma amacıyla fiziksel olarak rüzgâr tüneli etkisinin denenerek modelin oluşturulmasını sağlayan bir yazılımdır. Oluşturulan rüzgâr tünelinin formu ve hava akışının oluşturduğu etki kaydedilmekte ve iç ve dış mekânda rüzgârın kullanımının nasıl olması gerektiğine dair yorumlamalar ve çıkarımlar yapılmasını sağlamaktadır. Solidworks, pek çok bilim dalında kullanılmaktadır [45]. Simülasyon programı ile yapılan bir analiz sonucunda, yapıya etki eden rüzgâr ve rüzgâr etkisini üzerinde yorumlamalar yapılmaktadır.

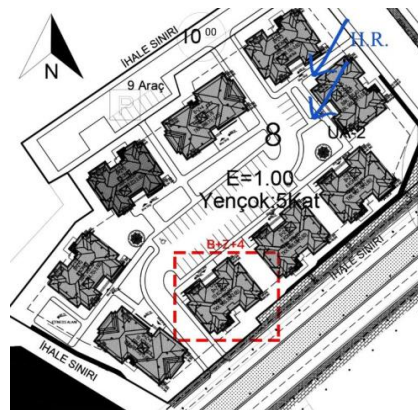
Solidworks Flow Simulation kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada analizler üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle binaların katı modelleri Solidworks programında hazırlanmıştır. Daha sonra, katı model etrafında rüzgâr simülasyonunu modellemek amacıyla yeterince büyük bir akış hacmi oluşturulmuştur. Akış yönü simülasyon yapılacak olan ildeki hâkim rüzgârın geliş yönüne göre belirlenmiştir. Akış hacmi oluşturulduktan sonra Flow Simulation modülünde bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra sınır şartları girilerek analizler tüm iller için ayrı ayrı yapılmıştır. Analizlerde giriş sınır şartı olarak akış hızı kullanılmıştır. Farklı iller için hâkim rüzgâra göre hızlar programa girilmiştir. Çıkış sınır şartı olarak atmosfer çıkışı alınmıştır. Analizlerde akış olarak hava ve türbülanslı yapıyı çözmek için programda mevcut olan k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Analizler sonucunda farklı iller için hız konturları alınarak etkili doğal havalandırma üzerine kıyaslamalar yapılmıştır. Analizlerle elde edilen görsellerden dış-iç mekânda rüzgâr hızının ve yönünün değişimi ile mekânlarda meydana gelen hava sirkülasyonları hakkında da yorumlara yer verilmiştir.

BULGULAR (RESULTS)

Doğal Havalandırma Analizi (Natural Ventilation Analysis)

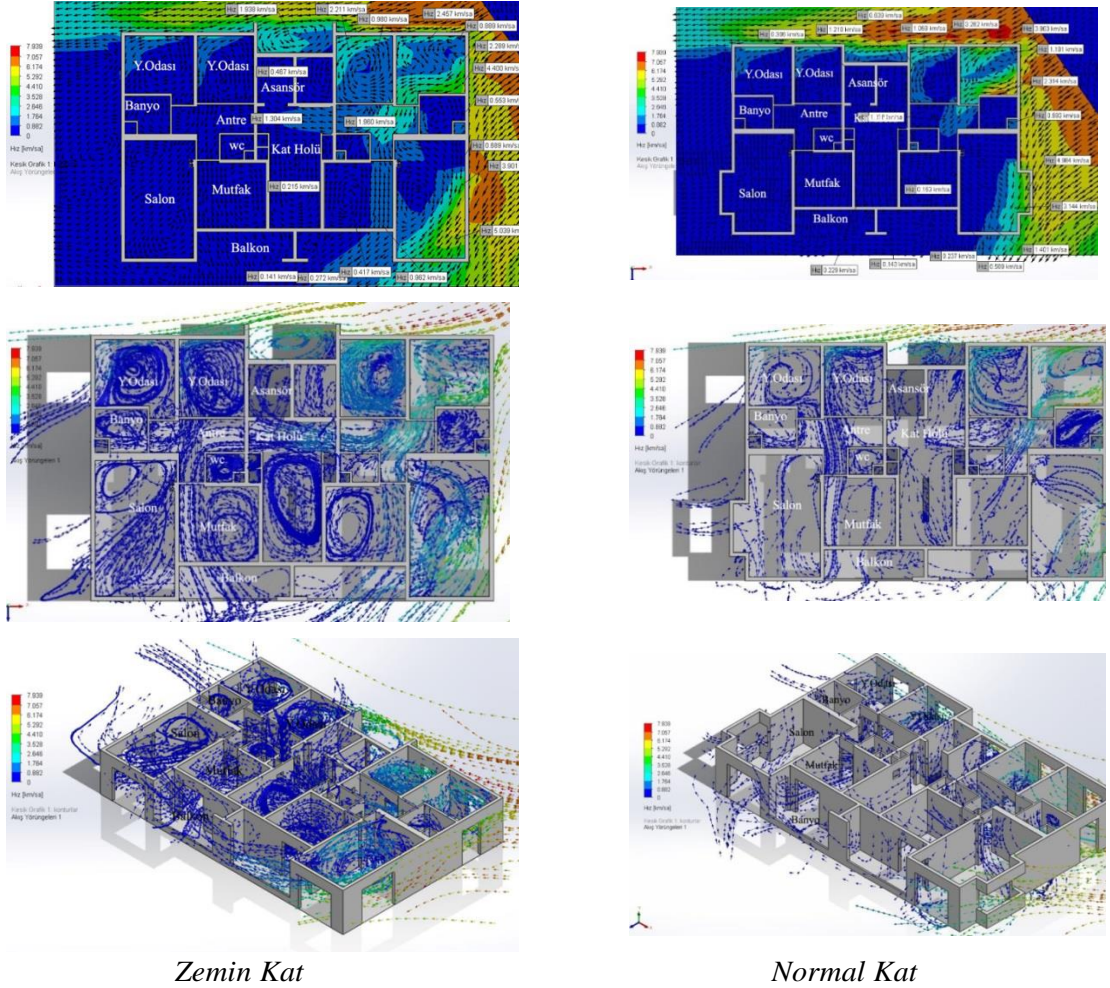
Sıcak-Kuru İklim Bölgesi: Gaziantep İli Örneği (Hot-Dry Climate Zone: Example of Gaziantep Province)

Sıcak kuru iklim bölgesi özelinde Gaziantep İli, Şehitkamil İlçesi Kuzeyşehir 5.Etap 646 konuttan oluşan proje seçilmiştir. Seçilen bölgede kuzey-doğu yönünde 6 km/h'lik hız ile esen rüzgâr etkisi altında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de ilgili tip proje vaziyet planı ve hâkim rüzgâr yönü (HR) gösterilmiştir.



Şekil 2. Vaziyet Planı ve HR yönü

Projenin plan çözümünde zemin kat ve normal kat arasında farklılık olması sebebi ile zemin kat ve normal kat ayrı ayrı modellenerek analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına ait hız konturları ve akım çizgisi modelleri, Şekil 3'te görülmektedir. Rüzgâr yönüne çapraz olarak yerleştirilen konutta hava akımı öncelikle sivri köşe ile karşılaştığı için enerjisinde azalma meydana gelmiştir. Böylece, rüzgârın bina cephesindeki etkisi azaltılmıştır. İlgili projede bina girişi hâkim rüzgâr yönüne direkt açılmamıştır. Bina girişine eklenen rüzgârlık ile daha kontrollü bir hava girişi sağlanmıştır. Şekil 3'ten de görüleceği gibi bina girişine ulaşan hava yavaşlayarak girdap etkisi oluşturmakta ve iklimin sıcak etkisi azaltılmaktadır. Kat holüne giren hava, merdiven kovanından baca etkisi ve girişten gelen hava akımı ile katlar arasında etkin havalandırma sağlanmaktadır.



Şekil 3. Kat planları ve perspektifi üzerinden doğal havalandırma analizi

Binaya çapraz olarak pencerelerden giren hava akımının antreden salona ulaşması ile etkin doğal havalandırma sağlanmaktadır. Bununla beraber mutfakta hava akımının düzensizleştiği ve oda içerisinde dönümlü bir akış olduğu görülmektedir. Seçilen projede antreden ve odalardan mutfaka yoğun hava akışı ulaşmaktadır ve bu sayede kirli hava balkondan doğrudan atılmaktadır. Yatak odalarından iç mekâna alınan hâkim rüzgâr kapı açıklıkları ile antreye iletilirken mekânda doğal hava sirkülasyonunu da sağlanmaktadır. Banyoda ise hava akımının hızı düşmekte ve mekândan hava çıkışı sağlanamamaktadır. Yarı açık mekân olan balkon ise ihtiyaç duyulan rüzgârı almamaktadır. Kat holünde bulunan pencereler ve düşey sirkülasyon elamanı merdiven açıklığı, sayesinde doğal havalandırma zemine nazaran daha etkin sağlanmaktadır.

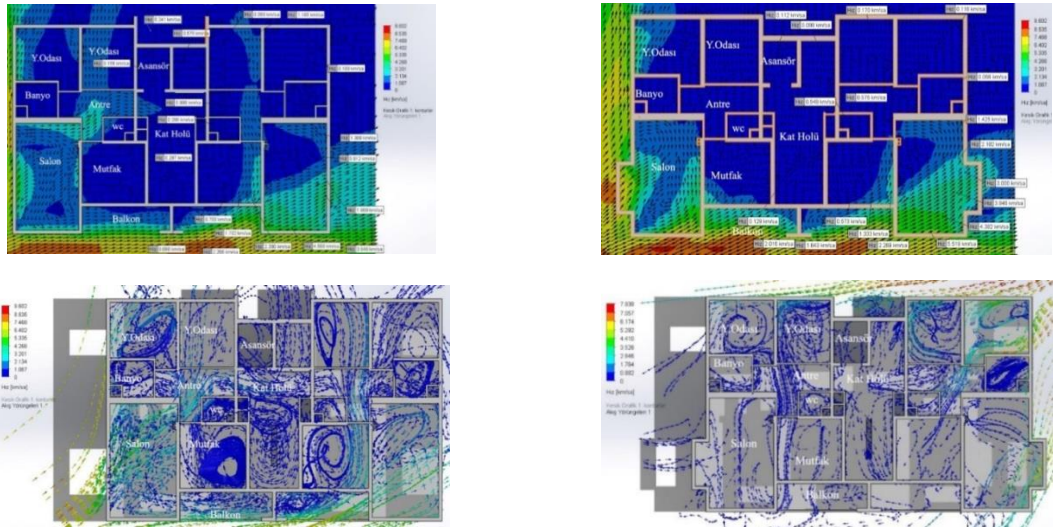
Ilımlı-Kuru İklim Bölgesi: Karaman İli Örneği (Moderate-Dry Climate Zone: Example of Karaman Province)

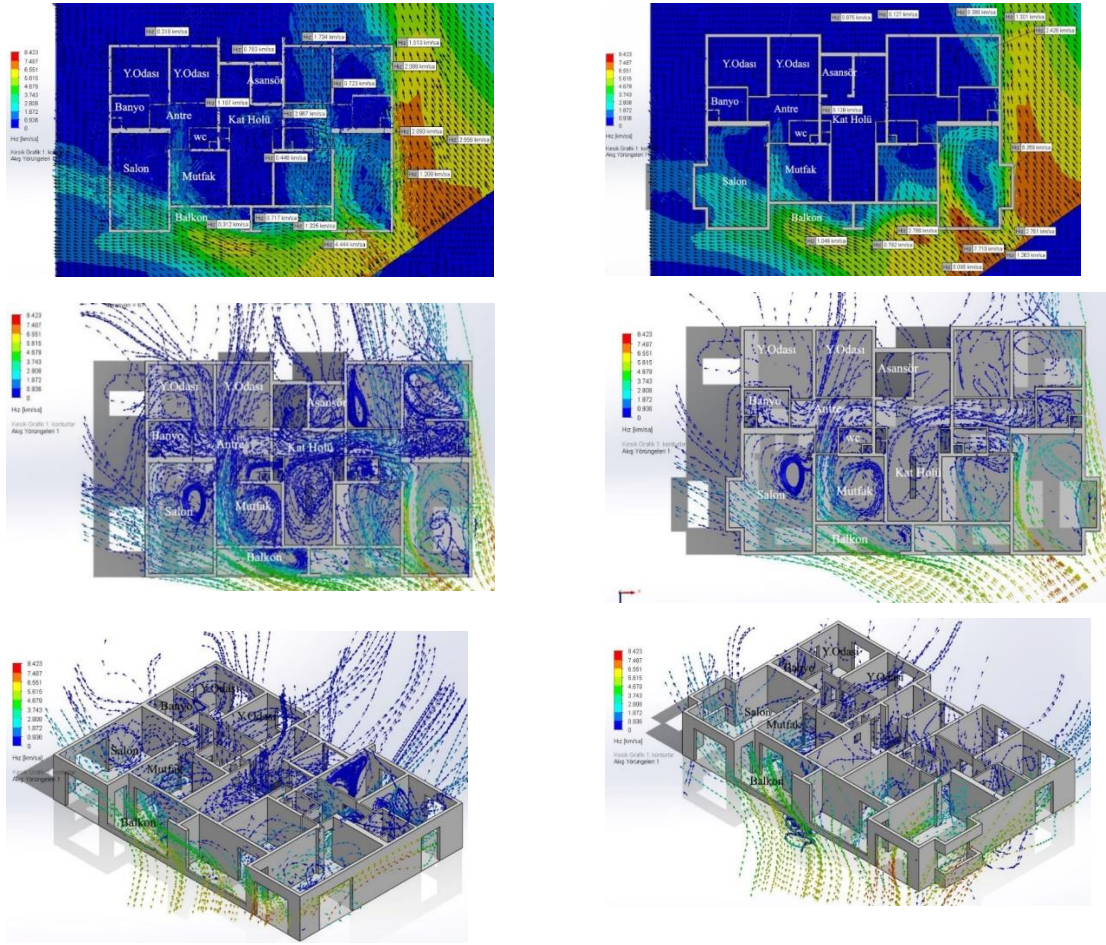
Bu bölgede Karaman İli, Merkez İlçesi, Kırbağı Mahallesi 364 konuttan oluşan proje seçilmiştir. Seçilen bölgede rüzgâr, yaklaşık 7 km/h'lik hız ile güney-batı yönünde esmektedir. Şekil 4'te ilgili tip proje vaziyet planı ve HR gösterilmiştir.



Şekil 4. Vaziyet Planı ve HR yönü

Bu binada giriş rüzgâr yönüne ters olacak şekilde tasarlanarak iç mekândaki havanın dışarı atılmasına yardımcı olmuştur. Özellikle binaya giriş yapan kullanıcılar mekân içindeki havadan etkilenebilmekte ve istenilen ölçüde doğal havalandırmamış bu mekânlarda rahatsız edici kokular oluşabilmektedir. Balkon kapısından içeri giren hava, pencere boşluklarından çıkmakta ve böylece çapraz havalandırma sağlanabilmektedir. Bu şekilde mekân içinde de serinletici bir etki oluşmaktadır. Yapıya etki eden hâkim rüzgâr yönüne açılan balkondan doğrudan alınan hava akımı mutfak içinde de türbülansa sebep olmaktadır. Böylece mekân içinde rahatsız edici bir hava akımı oluşmaktadır. Hava akışı mutfak mekânından yatak holüne iletilirken jet etkisiyle hızlanmakta, mutfaktaki koku ve sıcaklık yatma birimlerine kadar ulaşmaktadır. Analiz edilen bu tip projede dairelerden kat holüne kirli hava akımı ulaşmaktadır. Bu nedenle de kat boyunca taze hava sirküle edilememektedir. Islak hacimlerden banyoda da benzer şekilde nitelikli havalandırma sağlanamamaktadır. Bu binada kat hollerindeki hava sirkülasyonu daire iç mekânlarından, merdiven kovalarından ve şaftlar arasında meydana gelen hava akımından sağlanmaktadır. Kat hollerine açılan pencerelerden ve merdiven kovalarından iletilen hava ile daire içinden gelen hava akımı, ortak kullanım alanlarının doğal olarak havalanmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde katlar modellenmiştir ve Şekil 5'te analiz sonuçlarına ait hız konturları ve akım çizgisi modelleri verilmiştir.





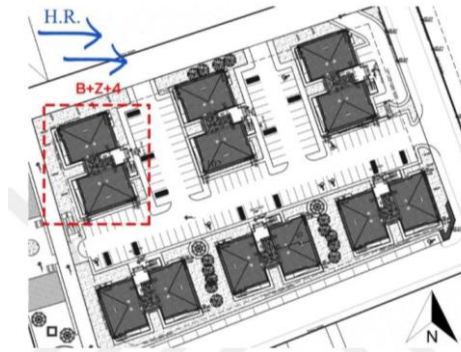
Zemin Kat

Normal Kat

Şekil 7. Kat planları ve perspektifi üzerinden doğal havalandırma analizi

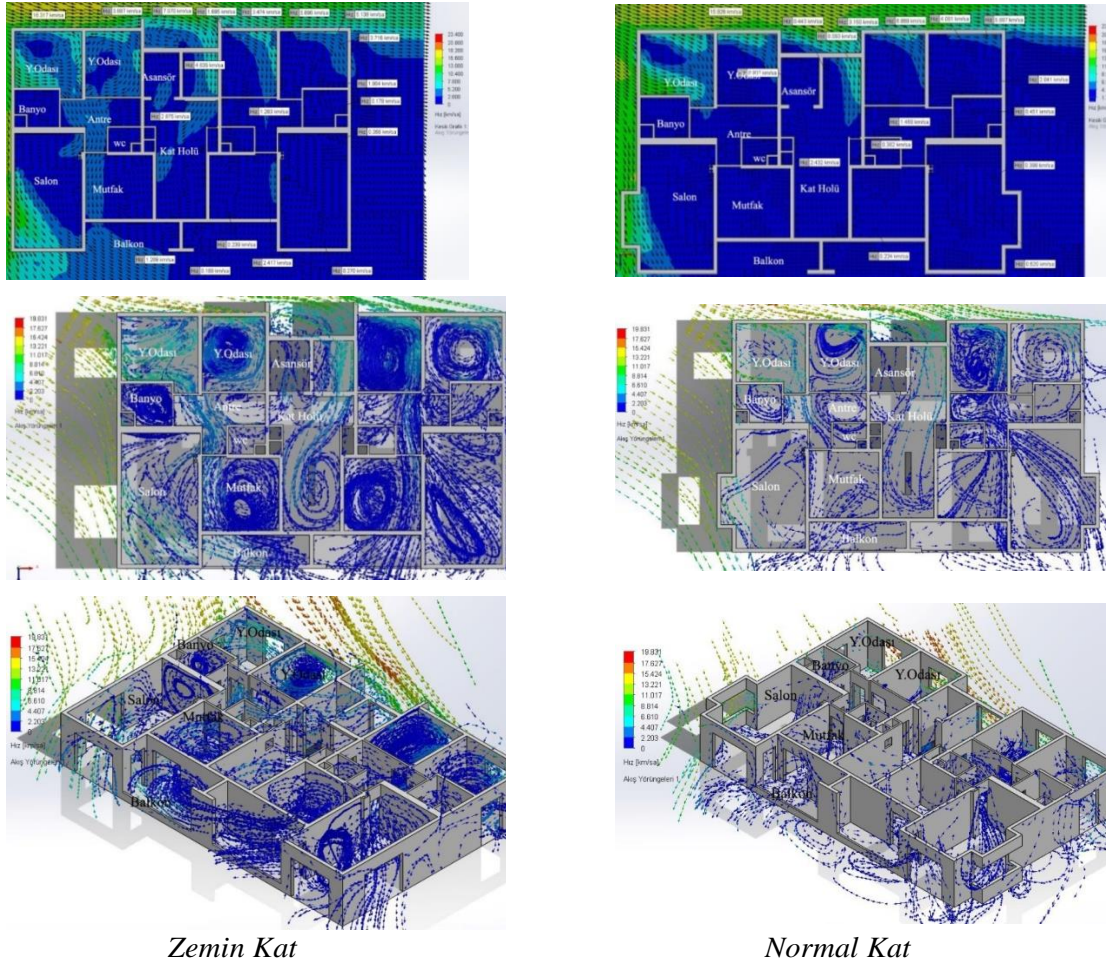
Sıcak-Nemli İklim Bölgesi: Mersin İli Örneği (Hot-Humid Climate Region: Mersin Province Example)

Sıcak nemli iklim bölgesi özelinde Mersin, Mezitli, Mezitli Mahallesi 262 Adet Konuttan oluşan proje seçilmiştir. Seçilen bölgede rüzgâr, yaklaşık 14 km/h'lık hız ile batı yönünde esmektedir. Şekil 8'de ilgili tip proje vaziyet planı ve HR gösterilmiştir.



Şekil 8. Vaziyet Planı ve HR yönü

Analiz sonuçlarına ait hız konturları ve akım çizgisi modelleri görsel olarak Şekil 9'da verilmiştir.

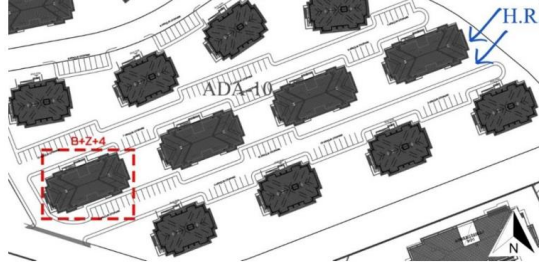


Şekil 9. Kat planları ve perspektifi üzerinden doğal havalandırma analizi

İncelenen bu binada hâkim rüzgârın yapının köşesinden bina içine dağıldığı görülmektedir. Temiz hava bina girişinden alınmakta ve buradan da kat hollerine aktarılmaktadır. Binanın salonunda bulunan pencerelerden giren hâkim rüzgâr hava kalitesini artırmaktadır fakat diğer mekânlardan antreye ve buradan da salona gelen hava gerekli taze hava miktarını düşürmektedir. Mutfak ise yatma birimlerinden gelen ve antrede toplanan havanın sirkülasyonu ile havalanmaktadır. Bu mekânda yeterli hava akımı dolaşımı olmamaktadır. Bu durumda mutfak mekânında rahatsız edici koku ve yüksek ısının oluşumuna neden olmaktadır. Yatak birimindeki hava alışverişindeki süreklilik ile doğal havalandırma meydana gelmektedir. Ebeveyn yatak odasında ise meydana gelen girdap etkisi ve hava akımındaki hız değişimi kullanıcı konforunu etkilemektedir. Özellikle sıcaklık artışlarında daha konforlu bir mekân meydana gelmektedir. Balkonların yarı açık olarak tasarlanmış olması bu mekânlara havanın doğrudan ulaşmamasına ve havalandırma konforunun düşmesine neden olmaktadır. Banyoda ise hava girişlerinin ve çıkışlarının düzenli bir aks üzerinden meydana geldiği görülmektedir. Kat holüne pencere açıklığından taze hava gelirken zemin kattaki havanın merdiven boşluğunda oluşan baca etkisiyle de bu katlara ulaştığı görülmektedir. Bu açıdan sıcak ve nemli iklim bölgelerinde tasarlanacak olan yapılarda katların havalandırılması ve temiz havanın dairelere dağılması oldukça önemlidir ve bu durum olumlu bir etki olarak değerlendirilmiştir.

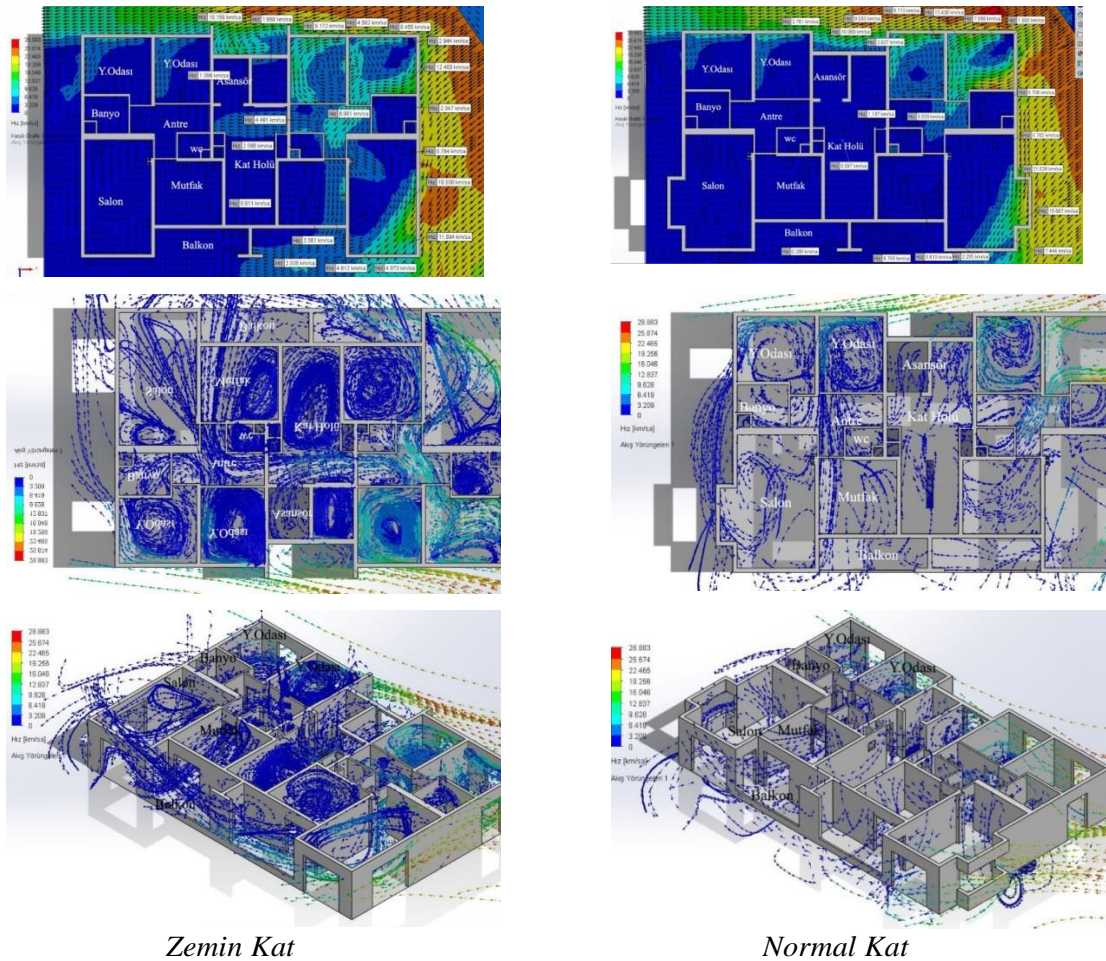
Ilımlı-Nemli İklim Bölgesi: Balıkesir İli Örneği (Moderate-Humid Climate Zone: Example of Balıkesir Province)

Ilımlı nemli iklim bölgesi özelinde Marmara ve Ege denizine kıyısı bulunan Balıkesir İli, Altı Eylül İlçesi, Gaziosmanpaşa Mahallesi, 726 konuttan oluşan proje seçilmiştir. Ele alınan bölgede rüzgâr, yaklaşık 23 km/h'lik hız ile kuzey-doğu yönünde esmektedir. Şekil 10'da ilgili tip proje vaziyet planı ve HR gösterilmiştir.



Şekil 10. Vaziyet Planı ve HR yönü

Bina girişinin hâkim rüzgâr yönünde konumlanması, açık doğal havalandırmaya neden olması ve nemin dağıtılması açısından yapının girişindeki kullanıcı konforunu etkilemektedir. Ayrıca girişte yer alan rüzgârlık hava akımının kontrol edilmesini de sağlamaktadır. Analiz sonuçlarına ait hız konturları ve akım çizgisi modelleri Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Kat planları ve perspektifi üzerinden doğal havalandırma analizi

Bu yapıdaki salon açıklıkları hava giriş çıkışının oldukça etkili olmasına neden olmakta ve ilgili mekân çapraz havalanmaktadır. Bu sayede de temiz rüzgâr akımı ilgili birime girmekte ve kullanıcı için de konforlu bir havalandırma oluşmaktadır. Yatak odasında bulunan pencere açıklıklarının yere kadar inmesi ve açıklığın hâkim rüzgâra açılması mekâna taze hava akımını getirmekte ve akım kapı boşluğundan antreye aktarılmaktadır. Çocuk yatak odasında meydana gelen girdap etkisi ve rüzgârın hızı sorun oluşturabilmektedir. Banyodaki hava dönmümlü bir akış haline gelmektedir ve her yüzeye ulaşarak atılmakta bu şekilde de nemin giderilmesi sağlanmaktadır.

Mutfak mekânı yeterli olarak havalanmamaktadır. Antreden gelen hava ebeveyn yatak odasından çapraz olarak gelen hava ile oldukça iyi bir doğal ventilasyon sağlamamaktadır. Meydana gelen girdap etkisi ve ayrıca balkondan dışarı çıkan hava nem ve kokunun bertaraf edilmesini sağlamaktadır. Balkon birimi, korunaklı olması nedeniyle etkili bir doğal havalandırmaya sahip değildir. Ayrıca kat holüne pencerelerden ve merdiven kovanından etkili temiz hava ulaşmamaktadır.

TARTIŞMA (DISCUSSION)

Çalışma kapsamında belirlenen projelerin modelleri oluşturulup veri girişleri yapılarak mekânların doğal havalandırma simülasyonları elde edilmiştir. Farklı iklim bölgeleri için yapılan analizler sonucunda mekânların doğal havalandırma düzeylerinin farklılaştığı tespit edilmiştir. Farklı iklim bölgelerinde konumlanan projeler, etkin doğal havalandırma analizleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve tablolaştırılmıştır (Tablo 1). Elde edilen analiz görselleri üzerinde havalandırma her mekânda bulunmakta fakat girdap etkisi veya yetersiz hava gibi nedenlerden dolayı tabloda “x” simgesi ile işaretlenen mekânlarda etkili ve sağlıklı bir havalandırmanın olmadığı, tabloda “√” simgesi ile işaretlenen mekânlarda sağlıklı bir havalandırmanın olduğu ifade edilmektedir.

Tablo 1. İklim bölgeleri-iç mekân doğal havalandırma matrisi

İKLİM BÖLGESİ	RÜZGÂR HIZI (KM/H)	GİRİŞ VE KAT HOLLERİ	ANTRE	MUTFAK	SALON	YATAK ODASI	Ç. YATAK ODASI	BANYO	BALKON
Sıcak-Kuru	6	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	X
Ilımlı-Kuru	7	X	✓	X	✓	X	X	✓	X
Soğuk	6	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	X
Sıcak-Nemli	14	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	X
Ilımlı-Nemli	23	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X

Sıcak-kuru iklim bölgesi Gaziantep ilinde, bina girişinin hâkim rüzgâr yönünden verilmesi kuvvetli hava akımının iç mekâna alınmasını sağlayarak etkin doğal havalandırmanın sağlanmasında faydalı olmuştur. Ilımlı-kuru iklim bölgesi Karaman ilinde ise bina girişinin hâkim rüzgârın tersinde kalması dolayısıyla iç mekâna yeterli hava akımı ulaşmamaktadır. Ilımlı kuru iklim bölgesinde bina girişinin hâkim rüzgâra açılması aranırken soğuk-kuru iklim bölgesi Van ilinde bina girişinin hâkim rüzgâra ters tasarlanması; şiddetli rüzgâr, kar yağışı, don etkisi gibi bulunduğu iklim koşullarının olumsuz etkilerinden korunmayı sağlaması sebebi ile olumlu değerlendirilmektedir. Sıcak-nemli iklim bölgesi Mersin ilinde ise hâkim rüzgâr yönünde bina girişinin verilmesi doğal havanın katlara dağılmasını ve rüzgârın serinletici etkisinden faydalanılmasını sağladığı için tercih edilmektedir. Ilımlı-nemli iklim bölgesi Balıkesir ilinde de bina girişinden hâkim rüzgâr iç mekâna alınarak hava akımı daire içlerine ve katlara ulaşmakta ve doğal havalandırmada etkili olmaktadır. Sıcak-kuru, ılımlı-nemli iklim bölgelerinde iç mekân hava akımı antrede sirküle ederek değişmekte ve bina içinde ve kat holündeki oluşan farklı basınç etkisi ile doğal havalandırma sağlanmaktadır. Soğuk-kuru iklim bölgesinde bulunan Van ili haricinde

mutfakta etkin doğal havalandırma sağlanmamaktadır. Mutfak biriminin havalandırılmasında mekanik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı iklim bölgelerinde bulunan aynı plan şemasına sahip projenin hâkim rüzgâr verileri doğrultusunda değerlendirmesinde soğuk kuru iklim bölgesi haricinde mutfak birimlerinin etkin doğal havalandırma sağlanmadığı tespit edilmiştir.

Farklı iklim bölgelerinde yapılan doğal havalandırma analizlerinden elde edilen veriler yaşama birimlerinin etkin doğal havalandırıldığını göstermektedir. Binaların cephe tasarımlarında pencere açılımlarının çapraz ve karşılıklı havalandırmaya imkân verecek şekilde düzenlenmesi analizlere de olumlu olarak yansımıştır. İç mekânların etkin doğal havalandırması insan sağlığı için büyük önem arz etmektedir.

Banyo birimlerinin doğal havalandırmasında kapı ve baca boşlukları yeterli olmaktadır. İklim bölgelerinin genelinde yatak odası pencerelerinin hava akımını iç mekâna alacak şekilde düzenlenmesi ile iç mekânda hava akımının dolaşımı sağlanmaktadır. Balkonlar ılımlı-nemli ve sıcak-nemli iklim bölgelerinde serinleme amacıyla ihtiyaç duyulan mekânlardır. Balkon birimlerinde doğal havalandırma için hava akımının sirküle edemediği ve etkin doğal havalandırmanın sağlanmadığı analiz görselleri üzerinden görülmektedir. Soğuk iklim bölgesinde balkonların doğrudan hâkim rüzgâra açılması, sıcak-nemli ve ılıman bölgelerde ise hâkim rüzgâra ters konumlanmasından dolayı balkonlar etkin doğal havalandırma ve kullanıcı konforu açısından olumsuz değerlendirilmiştir. Binaların kat hollerinde bulunan pencereler ve havalandırma bacasından gelen hava akımı merdiven kovalarından düşey yönde iletilmektedir. İncelenen örneklerin bulunduğu illerde hâkim rüzgâr fraklı yönlerden mekâna alınarak hava akışı sağlanırken, ısıtma ve soğutma problemleri göz ardı edilmiştir. İklim bölgeleri özelinde ısıtma ve soğutma yükünü azaltıcı tasarım yaklaşımlarının uygulanması da enerji sarfiyatı açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur.

İklim bölgeleri özelinde yapılan doğal havalandırma analizleri doğrultusunda hâkim rüzgârın iç mekâna alınması ve hava akışının sürekliliğinin sağlanması ile etkin doğal havalandırmanın ılımlı-nemli iklim bölgesinde sağlandığı tespit edilmiştir. Diğer iklim bölgelerinde ise etkin doğal havalandırma için binanın konumu, formu ve cephe tasarımında pencere kapı düzenlemeleri gibi farklı çözümler ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Bir yapının yer alacağı iklim bölgesi ile uyumlu tasarımların yapılması rüzgâr enerjisinden olumlu yararlanmayı ve aynı zamanda rüzgârın olumsuz etkilerinden de korunacak şekilde çözümler üretmeyi sağlamaktadır. Hem havalandırma hem de serinletme amaçlı mekân ve cephe tasarımlarında yer verilen açıklıkların pasif sistem ilkeleri doğrultusunda hava sirkülasyonunu sağlayacak şekilde düzenlenmesi enerji verimliliği için de önemlidir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgârın toplu konut özelinde doğal havalandırmadaki etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Türkiye’de yaygın olarak uygulanan TOKİ’ye ait 2+1 tip konut projesi seçilmiştir. Türkiye genelinde beş farklı iklim bölgesinde bulunan TOKİ tip konut proje modelleri üzerinden Solidworks programında yer alan Flow Simulation eklentisi ile doğal havalandırma analizleri yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Rüzgârın iç mekâna alınarak hava akışının sürekliliğinin sağlanması açısından ılımlı-nemli iklim bölgesinde etkin doğal havalandırmanın sağlandığı tespit edilmiştir.
- Soğuk-kuru iklim bölgesi (Van) hariç diğer tüm bölgelerde binalar HR alacak şekilde tasarlandıkları için doğal havalandırma oluşmaktadır. Van ilinde ise bu durum şiddetli

rüzgâr, kar yağışı ve don etkisi gibi iklim verilerinin negatif etkisini azaltmaktadır.

- Bina girişleri hâkim rüzgâr yönünde konumlanan yapılarda giriş esnasında kullanıcı konforu olumsuz etkilenmekle birlikte bina içinde daha etkin bir havalandırma sağlanmaktadır.
- Seçilen projelerde bina cepesinde yer alan pencere boşluklarının hava sirkülasyonuna izin verecek şekilde tasarlanmış olmasının da etkisi görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar beş farklı iklim bölgesinde yer alan tek tip TOKİ projesi ile sınırlı olduğu için planlarda yapılacak değişikliklerin de sonuçlara etki edeceği açıktır.
- Solidworks programında yer alan Flow Simulation eklentisinin kullanımının özellikle planlama ve mekânların doğal havalandırmasına etkin parametrelerin tespiti için etkin ve önemli olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında yapılan analizler ışığında etkin doğal havalandırma için yeni tasarlanacak yapıların tasarım kurgusu için aşağıdaki önerilerde bulunulabilir;

a) Projelendirme detaylarında etkin doğal havalandırma için öneriler;

- Soğuk iklim bölgelerinde bina tasarımlarının bütüncül kareye yakın veya kısa kenarları hâkim rüzgâra dönük olarak tasarlanması, enerji tasarrufu açısından iklim bölgesi ile uyumlu olmasını sağlar. Ayrıca bina girişlerinin doğrudan hâkim rüzgâra açıldığı durumlarda rüzgârın kontrollü olarak mekâna alınması ve rüzgârlık gibi bir ara mekân ile binaya girilmesi rüzgârın olumsuz etkisinden korunmak için tercih edilmelidir. Kat hollerinde merdiven kovanında oluşan baca etkisinin, cephede oluşturulan açıklık ile desteklenmesi hava sirkülasyonu imkân vererek etkin doğal havalandırmayı sağlar.
- Ilıman-nemli ve sıcak-nemli iklim bölgelerinde, bina tasarımlarında binanın uzun kenarının hâkim rüzgâra yönelmesi ve bu cephede düzenlenen pencerelerden havanın doğrudan iç mekâna alınması etkin doğal havalandırma için tercih edilmelidir. Cephe tasarımlarında karşılıklı ve çapraz havalandırmayı kuvvetlendirecek düzenlemeler yapılmalıdır.
- Tüm iklim bölgeleri için mutfak havalandırmasında mekanik sistemlere çok ihtiyaç olmayacak şekilde çapraz havalandırma imkânlı düzenlemelerle etkin doğal havalandırma sağlanmalıdır. Benzer şekilde hava sirkülasyonunun yön değiştirmesine imkân sağlayacak şekilde pencere açıklıkları düzenlenmeli, giriş kapıları karşısında açıklık tasarlanmamalıdır.
- Rüzgârın cephelerde oluşturduğu burgaçlar cephede aşınmalara ve malzeme kopmalarına sebep olabilmektedir. Bu noktalarda dayanıklı malzeme kullanılmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca cephelerde girdapların yoğunlaştığı bölgelerde kullanıcı konforunu olumsuz etkileyen akustik problemler oluşabilir. Bu durumlarda gürültü yalıtımlı ve aşınmaya dayanıklı uygun malzeme kullanımı ve form seçimi yapılması uygun olur.

b) Projelendirmede etkin doğal havalandırma için genel öneriler;

- Yeni tasarımlar yapılırken, rüzgârdan pasif olarak yararlanılmaya çalışılmalı ve cephe tasarımlarında pencere düzeni, ebatları, rüzgârın geliş yönü, hızı ve iç duvarların düzeni analizler ile değerlendirilerek kararlar verilmeli ve doğal havalandırma etkin tasarımların yapılması için gerekli düzenlemeler ve kontroller de imar mevzuatlarınca desteklenmelidir.

- İklim bölgeleri özelinde hava akımı iç mekâna kontrollü olarak alınmalıdır. Soğuk ve ılımlı-kuru iklim bölgelerinde hâkim rüzgâra direk açılan tasarımlara yer verilmemelidir.
- İleriki çalışmalarda farklı iklim bölgelerinde hâkim rüzgâr yönüne göre aynı konumlanmış tip projelerin analizi yapılarak iklim bölgesi özelinde rüzgârın etkin doğal havalandırmadaki rolü daha net görülebilecektir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sadece rüzgâr hızı ve yönüne ait verilere bağlı değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda nem, sıcaklık ve basınç gibi iç ortam mekân kalitesine dair parametreler de dikkate alınarak yeni çalışmalar kurgulanabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, çalışmanın analiz kısmında yardımları için enerji sistemleri mühendisliği yüksek lisans öğrencisi Tunahan TÜRK'e teşekkür ederler.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

H.D.A.: Fikir/Kavram (Conceptualization), Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Yazı Yazan (Writing - Original Draft), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing), **S.M.A.B.:** Tasarım ve Dizayn (Methodology), Yazılım (Software), Malzemeler (Resources), Veri Toplama ve/veya İşleme (Data Curation), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Literatür Taraması (Investigation), **S.D.:** Yazılım (Software), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] P.O. Akadiri, A.E. Chinyio, O.P. Olomolaiye, Design of a sustainable building: a conceptual framework for implementing sustainability in the building sector, *Buildings*. 2 (2012), 126-152. doi:10.3390/buildings2020126
- [2] M. Bell, Energy Efficiency in Existing Building: The Role of Building Regulations, içinde: *COBRA 2004 - The international construction research conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors*, London, England, 2004, 7-8.
- [3] H. Bennetts, A. Radford, T. Williamson, Understanding Sustainable Architecture (1st ed.), *Taylor & Francis*, 2002. doi:10.4324/9780203217290
- [4] Z. D. Arsan, Enerji etkin mimarlık yaklaşımları üzerine bir eleştiri. Dosya: bir tasarım konusu olarak enerji etkin mimarlık, *Ege Mimarlık Dergisi*. 68 (2009), 18-24.
- [5] R. Janssen, Towards energy efficient buildings in Europe, Final Report, *The European Alliance of Companies for Energy Efficiency in Buildings*, 2004.
- [6] H.D. Arslan, E. Gülşeker, Evaluation of Sustainable Education Buildings on Samples, içinde: Fırat S., Kinuthia J., Abid A.T.(Ed), *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, 2018: ss.296-308. doi:10.1007/978-3-319-63709-9_23
- [7] H.D. Arslan, E. Gülşeker, LEED Sertifikasyon Sisteminde Eğitim Yapısı Değerlendirmesi, içinde Kasmıo R., Kudumovic L. (Ed.), *Mimarlık, Planlama ve Tasarım Alanında Teori ve Araştırmalar, Gece Kitaplığı Basım*, 2020: ss.135-162
- [8] S.M. Bilgili Acar, Farklı İklim Bölgelerinde Doğal Havalandırma Yöntemlerinin TOKİ Tıp Konutları Üzerinden Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı*, Konya, 2023.
- [9] B.Ü. Karaca, İlkokul dersliklerinde iç hava kalitesinin iyileştirilmesi üzerine bir araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 33 (2022), 60-67. doi:10.31590/ejosat.1018560
- [10] G. Harputlugil, B. Kılınç, Enerji Verimli Bina Tasarım Stratejileri El Kitabı, EuropeAid/134786/IH/SER/TR Sözleşme No: TR2011/0315.20-01/001, Ankara, (2016).
- [11] Y. Zhang, J. Mo, J. R. Cheng, Developing a sustainable indoor air environment: problems, considerations and suggestions (in China). *Chinese Science Bulletin*. 60 (2015), 1651–1660.
- [12] P. Jones, Housing: From low energy to zero carbon. The SAGE Handbook of Housing Studies, *SAGE Publications*, 2012. doi:10.4135/9781446247570.n18
- [13] T. Schulze, Natural Ventilation of High-Rise Buildings A Methodology For Planning With Different Analysis Tools and Case-Study Integration, Ph.D. Thesis, *Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering and Technology, Department of Architecture- Construction Sciences Programme Department of Energy - Energetics Programme*, İstanbul, 2015.
- [14] E. Türkmen, Yapılarda Enerji Etkinliği Sağlayan Tasarım Kriterlerinin Geleneksel Mimari Bağlamında (Ayvalık) Küçükköy Örneğinde İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Mimari Tasarım Programı*, İstanbul, 2017.
- [15] R. Darçın, A. Balanlı, Yapılarda doğal havalandırma sağlanmasına yönelik ilkeler. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*. 128 (2012), 33-42.
- [16] G. Aşçı, Yüksek Yapılarda Doğal Havalandırma Sistemlerinin Araştırılması, İstanbul Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı*, İstanbul, 2015.
- [17] P.U. Erkınay, Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinin Türkiye’de binalarda kullanımı üzerine bir inceleme, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2012.

- [18] S. Çakır, Binalarda Doğal Ventilasyon Sisteminin Değerlendirmesine Yönelik Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2003.
- [19] M.A. Özgür, Review of Turkey's renewable energy potential, *Renewable Energy*. 33(11) (2008), 2345-2356.
- [20] H. Balat, Contribution of green energy sources to electrical power production of turkey: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(6) (2008), 1652-1666.
- [21] Z. İlkılıç, Türkiye’de rüzgâr enerjisi ve rüzgâr enerji sistemlerinin gelişimi, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*. 6(2/2) (2016), 1-13.
- [22] H. D. Arslan, Konya Sonsuz Şükran Köyü Konutlarının Ekolojik Yönden İncelenmesi, içinde: Çabuk A., Aşıkutlu H.S.(Ed.), *Mimarlık, Planlama ve Tasarım Alanında Yeni Trendler, Duvar Yayınevi*, 2022: ss. 75–97.
- [23] Ö. Şabanoğlu, Toplu Konut Yerleşimlerindeki Açık Alanlarda Rüzgârın Kullanıcı Konforuna Etkisinin Analizi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı*, İstanbul, 2018.
- [24] B.L. da Silva, R. Chakravarty, D. Sumner, D.J. Bergstrom, Aerodynamic forces and three-dimensional flow structures in the mean wake of a surface-mounted finiteheight square prism, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 83 (2020), 108569.
- [25] N. N. Ziarani, M.J. Cook, F. Freidooni, P.D. O'Sullivan, The role of near-façade flow in wind-dominant single-sided natural ventilation for an isolated three-storey building: An LES study, *Building and Environment*. (2023), 235.
- [26] Ş. Boduroğlu, S. Karıptaş, Akıllı Binalarda Enerji Etkin Kabuk Tasarımı, *Yapı Fiziği ve Sürdürülebilir Tasarım Kongresi*, 2010, 1-7.
- [27] G. Yeşilli, Gelişmiş Cephe Sistemlerinin Ekolojik Enerji Etkin Tasarım Çerçevesinde İncelenmesi, İklim Verilerine Göre Değişimi ve Geleceğe Yönelik Öngörüler, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı*, Ankara, 2016.
- [28] Z. Zhai, Application of computational fluid dynamics in building design: aspects and trends, *Indoor Built Environment*. 15(4) (2006), 307.
- [29] E. Gündoğdu, H.D. Arslan, Mimaride enerji etkin cephe ve biyomimikri. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji (GU J Sci, Part C)*. 8(4) (2020) 922-935. doi: 10.29109/GUJSC.799424
- [30] İ. Yüksek, T. Esin, Yapılarda Enerji Etkinliği Bağlamında Doğal Havalandırma Yöntemlerinin Önemi, *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 2011, 205-221.
- [31] N. Javadi, Mimari Tasarımda Güneş, Işık ve Doğal Havalandırma Uygulanması, İran Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı*, İstanbul, 2017.
- [32] İ. Yuyucu, Bilgisayar Analiz Yöntemleriyle, Yapılarda Doğal Havalandırma Sistemlerinin Örnekler Üzerinden İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Mimarlık Bilim Dalı*, İstanbul, 2016.
- [33] E. Yaşa, Avlulu Binalarda Doğal Havalandırma ve Soğutma Açısından Rüzgâr Etkisi ile Oluşacak Hava Akımlarına Yüzey Açıklıklarının Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı*, İstanbul, 2004.
- [34] V. Ok, E. Yaşa, M. Özgünler, Avlu içi hava akımlarına bina cephesi açıklıklarının etkisi. *İTÜ Dergisi Seri A: Mimarlık, Planlama, Tasarım*. 8(1) (2009), 15- 27.
- [35] C. Yetiş, M. Tuna, Atriumlu Yapılarda Isıl Konfor ve Doğal Havalandırma İlkelerinin İncelenmesi, *II. Uluslararası ICONTECH Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu (ICONTECH 2020)*, 2020.

- [36] N. Sevim, N. Engin, Atriyumlu ofislerde doğal havalandırma ‘İlman iklim örneği’, *Online Journal of Art and Design*.7(2) (2019), 16-26
- [37] S. Zargari, Yeşil Binalarda Enerji Tasarrufu ve Geleneksel Yöntem Olarak Rüzgâr Bacası, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul*, 2015.
- [38] T. Sowell, The Housing Boom and Bust Revised Edition, *Basic Books Publishing, USA*, 2010.
- [39] S.S. Durduran, Konut seçimi sürecinin AHP temelli TOPSIS yöntemi ile analizi, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 2(2) (2020), 12-21.
- [40] R. Akkaş, İstanbul örneğinden hareketle bir arada yaşama kültürü üzerine kavramsal bir çerçeve, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*. 4(2) (2022), 202-219.
- [41] T. Alkan, S.S. Durduran, Konut Seçimi Sürecinin AHP Temelli TOPSIS Yöntemi ile Analizi, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 2(2) (2020), 12-21.
- [42] E. Yılmaz, Konut Sorunu ve Toplu Konut Üretiminde TOKİ’nin ve Belediyelerin Rolü. *Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(7) (2016), 31-50 .
- [43] Ö. Kaplankıran, F. Ünal, Mini insansız hava aracı etrafındaki akışın sayısal olarak incelenmesi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*. 3(4) (2009), 1- 12.
- [44] A. Jonuskaite, Flow simulation with SolidWorks, Bachelor Thesis, Arcada University of Applied Sciences, Plastics Technology, Helsinki, 2017.
- [45] SolidWorks, “SOLIDWORKS Flow Simulation,” Dassault Systemes, [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>(erişim23Ekim2023).

Tasarım Davranış Spektrumunun Saha Etkisi Dikkate Alınarak Değerlendirilmesi: Kocaeli Bölgesi Uygulaması, Türkiye

Yusuf GUZEL¹  Fidan GUZEL² 

¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Konya, Türkiye

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

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 10.08.2023

Kabul Tarihi: 02.01.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

Saha etkisi,
Sismik tasarım kodları,
Tasarım davranış spektrumu,
Tasarım spektrum analizi,
Zemin sınıfları.

ÖZET

Yeni yapılacak olan veya mevcut binaların güçlendirilmesinde deprem ivme hareketleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, modern deprem tasarım kodları, uygulama mühendislerine, farklı zemin sınıfları için standart tasarım davranış spektrumu sağlamaktadır. Bu çalışmada, yüksek deprenselliğe sahip Kocaeli bölgesindeki EC8 ve TBDY tasarım davranış spektrumu uygulamaları değerlendirilmektedir. Bu amaçla, öncelikle Kocaeli bölgesinin deprenselliği, 17 Ağustos 1999 (Kocaeli) depremini de dikkate alarak, sunulmuştur. İkinci olarak, bu iki kodun tasarım davranış spektrumları birbirleriyle ve dört farklı zemin sınıfında kaydedilen gerçek ivme hareketlerinin spektral davranış eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra iki betonarme bina modelleri davranış spektrum analizleri ile incelenmiştir. Geçmiş sismik hareketler göz önüne alındığında, bölgenin her zaman büyüklüğü 5.0'den büyük olan deprem olaylarına eğilimli olduğu görülmektedir. Ayrıca Kocaeli deprem ivme hareketlerinin zemin özelliklerine bağlı olarak değişiklikleri gözlemlenmiştir. Bunun yanında, her iki deprem tasarım kodları da Kocaeli bölgesindeki her zemin sınıfında gerçek spektral değerlerini kapsayan tasarım davranış spektrumu sağlamaktadır. Bina analizlerinin sonuçları, EC8 tasarım tepki spektrumları ile elde edilen kesme kuvvetlerinin TBEC ve gerçek deprem spektral ivme değerlerinin kullanıldığı durumda elde edilen kesme kuvvetlerinden daha muhafazakar sonuçlar verdiği görülmektedir.

Considerations of Design Response Spectrum Involving Site Effect: Application to the Kocaeli Region, Türkiye

Article Info

Article History

Received: 10.08.2023

Accepted: 02.01.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Design response spectrum,
Response spectrum analysis,
Seismic design codes,
Site effect,
Soil classes.

ABSTRACT

Earthquake input motions perform critical role in the design of new or retrofitting of existing buildings. Therefore, modern seismic design codes guide engineering practitioners in delivering standard design response spectra for different soil classes. In this study, the applications of EC8 and TBEC design response spectra in the high-seismicity region of Kocaeli are evaluated. For that purpose, firstly, the seismicity of Kocaeli region involving the 17 August 1999 (Kocaeli) earthquake event is presented. Secondly, design response spectra of these two codes are compared with each other and with the spectral response curves of the actual input motions recorded at four different soil classes. Later, two reinforced concrete building models are analyzed by means of response spectrum analyses. Based on past seismic activities, the area is always prone to earthquake events, possibly occurring with magnitudes greater than 5.0. Also, the characteristics of the Kocaeli earthquake input motions were shown to be altered by the changes in the soil deposits. Besides, both seismic design codes are able to provide design response spectra covering the actual spectral values well at each soil class in the Kocaeli region. The results of building analyses suggest that the EC8 design response spectra offer more conservative building shear forces, followed by the TBEC and the actual ones.

To cite this article:

Guzel, Y. & Guzel, F. (2024). Considerations of design response spectrum involving site effect: Application to the Kocaeli region, Türkiye, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 40-57. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.31>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Yusuf Güzel, yuguzel@erbakan.edu.tr



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

INTRODUCTION

Involvement of earthquake input motions in the design of structural buildings is very critical for building functioning after the earthquake event and, most importantly, for life safety. In order to verify that a structure can be able to retain its stability during seismic excitation, a seismic performance analysis is required [1]. The analysis involves spectral accelerations that represent the characteristics of the earthquake events prone to occur in the studied area [2]. The spectral acceleration values are greatly influenced by the features of the soil where the building is positioned. Because, depending on the soil characteristics, the frequency content, duration and peak ground values of the earthquake input motions undergo substantial alterations [3]. Such effects were reported following previous major earthquake events [4-6]. Therefore, the seismicity of the site and the local site conditions are pivotal factors shaping the spectral accelerations of an earthquake event (along with its magnitude) on the ground surface [7].

Seismicity of the site is determined by means of seismic hazard analysis based on the fault mechanism, occurrence rate and distance of the site to fault points [8]. Well-known attenuation relationships utilised in the seismic hazard analysis are Abrahamson-Silva [9], Boore [10], Campell [11], Ambraseys [12] and Idriss [13] models. Once the seismicity of the site is described, the local site conditions have to be characterized. Subsequently, proper site response analysis involving the nonlinear soil behavior is necessary to determine local site effect on earthquake input motions. When sufficient information for a site is unavailable, the average shear wave velocity at the top 30 m ($V_{s,30}$) is suggested to represent seismic soil behavior [14-15]. $V_{s,30}$ profile of a site can easily be attained from in-hole (i.e. Down-Hole or Cross-Hole) or surface (SASW, MASW or Microtremors) geophysical tests [16]. Else, it can also be depicted from the results of well-known field tests (i.e. standard penetration or cone penetration tests) [17-18].

Every earthquake event has unique spectral acceleration curves with several spectral peaks at varying periods. Therefore, one cannot rely on one single spectral acceleration curve in seismic performance analysis of a building in a specific site [2]. For this reason, there should be a standard design response spectrum that can represent all possible earthquake events. In the early developments of a standard response spectrum it was thought that, when considerable number of earthquake events are available, a general smooth design spectral acceleration curve can be proposed (e.g., [19-21]). With the increase of the earthquake input motion recordings in parallel with the technological developments enabling to better investigate soil deposits and fault mechanisms, the modern seismic design codes, as American Society of Civil Engineering (ASCE) [22], Eurocode 8 (EC8) [23] and Turkish Building Earthquake Code (TBEC) [24], provide smooth design response spectra. These seismic design codes involve distinct design response spectrum for every soil class classified with respect to the $V_{s,30}$. When the design response spectrum for the stiff soil deposits (having relatively higher $V_{s,30}$) represents the spectral peaks at shorter periods, it, for the soft soil deposits, covers the spectral peaks at longer periods [25-27].

The proxy of EC8 design response spectra are discussed by Rey et al. [28]. The study considered the earthquake input motions from the European Strong Motion Database and recommended different soil factors than the EC8 ones. Another work dealt with actual input motions archived in the K-Net Japanese Database. It was suggested to consider the larger spectral plateau than the ones given in the EC8 design response spectra [29]. The studies conducted by Pitilakis et al. [30] and Pitilakis et al. [31] also proposed new soil factors and design response spectra. In a similar way, the suitability of TBEC design response spectra was evaluated by considering the Kahramanmaraş earthquake events occurred on February 6, 2023 [32]. It was concluded that the design response spectra are not capable of fully representing the actual spectral accelerations, especially at longer periods for soft soil deposits. The

current and previous seismic hazard map over Türkiye was studied in terms of acceleration spectrum intensity (ASI) calculated from the spectral acceleration curves [33]. The results indicated that the ASI of current design response spectra for soft soil classes (i.e. ZE and ZD) are larger than the previous one in most of the studied cities, while at other soil classes (i.e. ZA, ZB and ZC) the ASI values increase in some cities and decrease in others. Similarly, short period and 1 s spectral acceleration values of the current and previous TBEC design response spectra were compared. It was found that the new version of the code provide greater spectral values than the previous one in short period when at 1 s the changes in spectral acceleration values vary depending on the location [34].

Particular interest of this study is an area in Türkiye (i.e., Kocaeli region) with high level of seismic hazard risk, as remembered by the 17 August 1999 Kocaeli earthquake event [35]. In 2018, tTBEC has been modified, particularly, in terms of design response spectrum and seismic soil classification. These modifications are obviously aimed to better design the buildings by, partly, better representing the earthquake input motions and the local site conditions. For this reason, this work aims to address the suitability of the design response spectra recommended by TBEC 2018 and EC8 applied in the Kocaeli province, Türkiye. The paper carries on by, firstly, explaining the seismic soil classifications at both codes. Subsequently, the seismicity of the site including the site effect observed in the 1999 Kocaeli earthquake event is specifically investigated. Afterwards, the suitability of code suggested design response spectra is represented by comparing them, at each soil class, with each other and with the spectral accelerations of the actual earthquake input motions. Lastly, the seismic performance analyses of 4 and 8 storey buildings are conducted through design response spectrum analysis method by considering the TBEC, EC8 and actual response spectrum curves.

EC8 And TBEC Design Response Spectra

In this study, the design response spectra given by TBEC 2018 and EC8 are assessed by comparing with the actual spectral accelerations of the input motions recorded across Türkiye. The reason to assess the TBEC design response spectra is due to the fact that it is applied in Türkiye as the study area and considered actual input motions are within the country. Besides, consideration of EC8 design response spectra is firstly for comparison purposes. Secondly, it sets up the basis for seismic design in Europe, in particular in seismically active countries (i.e., Italy, Greece, Romania).

It should be stressed that in the previous version of the TBEC code (i.e. [36]), the country was divided into four regions based on different levels of seismic intensity, with each region experiencing ground acceleration during an earthquake as follows: 0.1g, 0.2g, 0.3g and 0.4g.. In addition, it included constant corner periods and soil factors for each soil classes (e.g. soil classes A, B, C and D) in forming the design response spectra (similar approach included in EC8, too). In contrast, in the new version of the code, every specific location within Türkiye has unique PGA level defined by AFAD through the attenuation laws. Moreover, it defines short (0.2 s) and long period (1 s) spectral accelerations, used, which, along with the involvement of soil factors, determine corner periods and spectral accelerations.

The ranges of V_s utilized to classify a soil site are the same in EC8 and TBEC 2018. The difference lies only in the syllables, due to the fact that TBEC 2018 separates rock soil site into two groups as shown in Table 1. This study considers the syllables of EC8 in the classification of the soil site. EC8 makes two different design response spectra for each soil class available, based on earthquake magnitude. When the magnitude is equal or smaller than 5.5 it is regarded as Type 2. If it is greater than 5.5, it is called as Type 1. On the contrary, TBEC does not differentiate the design response spectra in respect to the earthquake magnitude.

Table 1. Shear wave velocity ranges in classifying seismic soil sites provided by EC8 And TBEC 2018

Design code/ $V_{s,30}$ (m/s) range	>1500	760-1500	360-760	180-360	<180
EC8	A		B	C	D
TBEC 2018	A	B	C	D	E

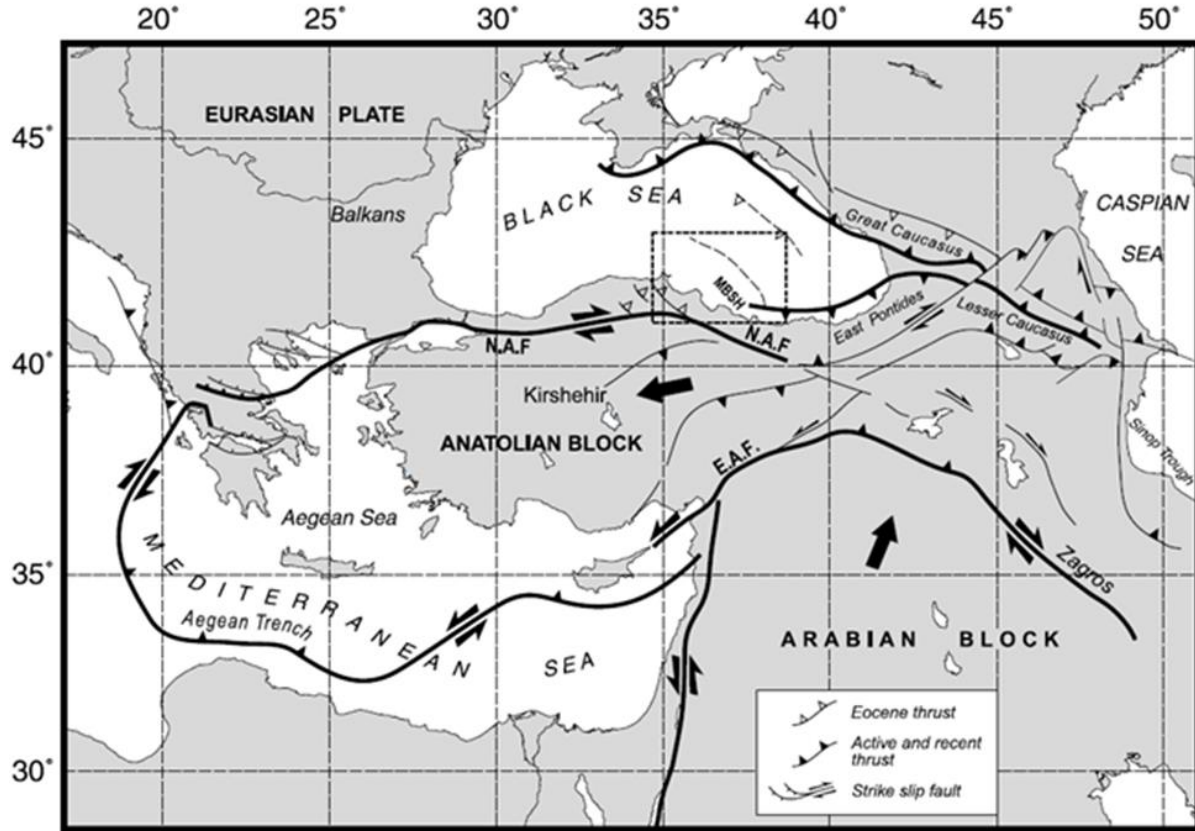


Figure 1. Tectonic plates and North Anatolian and East Anatolian Fault Zones [37]

Location And Seismicity Of The Site

The country of Türkiye is located on the borders between the Anatolian and Euroasian plates and between the Anatolian and Arabian plates. The relative movement between the Arabian and Anatolian plates and between the Euroasian and Anatolian plates are regarded as 6-10 mm/yr and 18.7-21.5 mm/yr, respectively [38-39]. This creates inter-plate fault zones along the plate borders named as North Anatolian Fault Zone (NAFZ) and East Anatolian Fault Zone (EAFZ). When NAFZ extends from east to west with 1600 km, EAFZ stretches from east towards southwest with 500 km, as seen in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**

The seismic intensity levels over the country of Türkiye is presented in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.a**. It is clear from the figure that the level of peak ground accelerations (PGA) are greater at sites closer to the fault zones (being as high as 0.76g). The PGA levels at far distant sites get lower with a minimum value of 0.071g. The focused site of Kocaeli region is located in the west-side of the country, neighboring with Istanbul, over NAFZ. The seismic intensity level of the region is closely shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.b** and is equal to, on average, 0.46g.

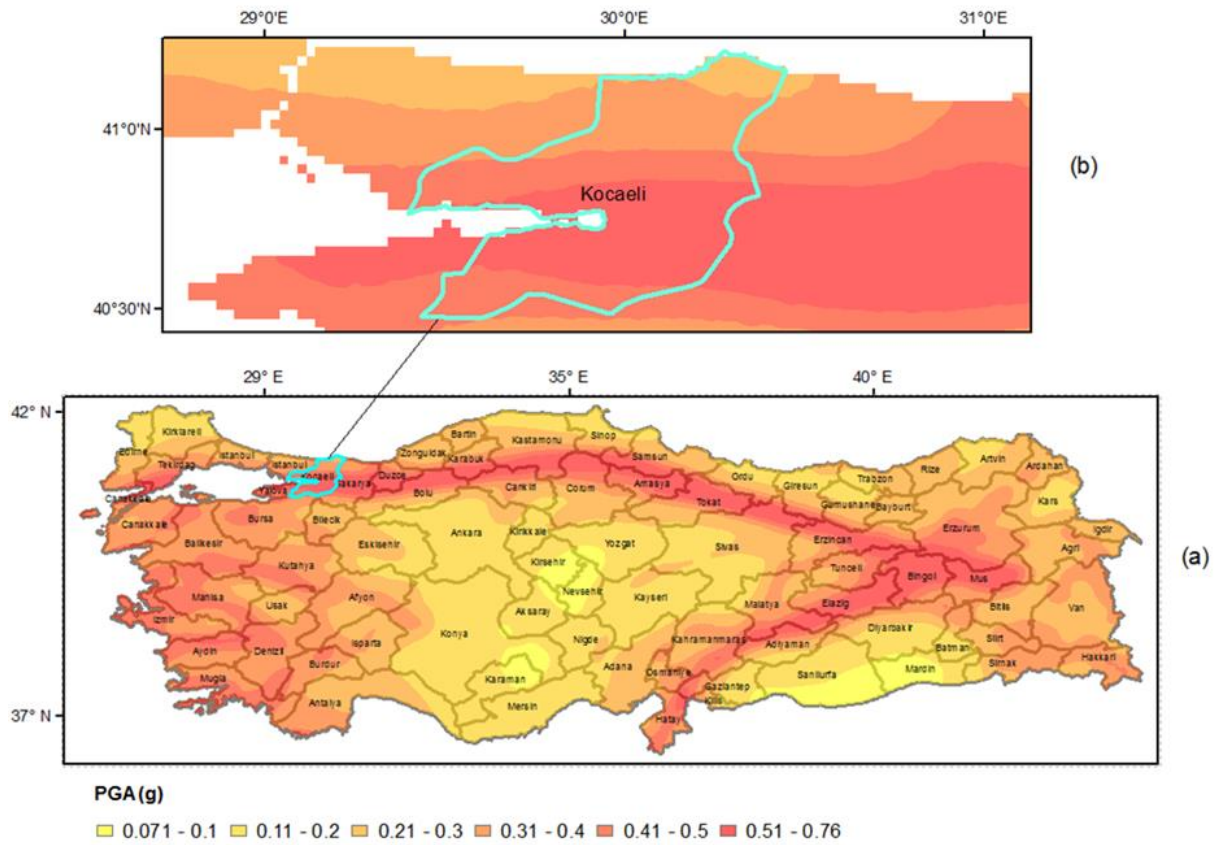


Figure 2. (a) Seismic map of Türkiye and (b) specifically the Kocaeli Region in terms of PGA level

Figure 3 exhibits the past earthquake events within and around the Kocaeli region. It is obvious that the greater the magnitude of an earthquake event gets, the rare it takes place. More precisely, the number of recorded earthquake events with different magnitude ranges is given in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** along with the annual rate of exceedance. When magnitudes between 4-4.5 occurs 143 times past 50 years, for 4.51-5.00 and for 5.10 and 5.50 magnitude ranges, the frequency values are 29 and 22, respectively. In addition, only 4 earthquake events with magnitude greater than 5.5 have been recorded around the region. This trend is also reflected in the annual rate of exceedance values getting smaller with the earthquake magnitudes becoming higher.

Table 2. The number of earthquake event occurrences (in 50 years) with specific magnitude ranges around the Kocaeli Region within the circle of 120 km in radius

Magnitude range	4.00- 4.50	4.51-5.00	5.10-5.50	5.60-6.00	6.10-7.60
Number of occurrences	143	29	22	2	2
Annual rate of exceedance	2.86	0.58	0.44	0.04	0.04

Kocaeli Earthquake Event And Site Effect Observations

One of the most remarkable and devastating earthquake event took place, within the region, on 17 August 1999 with a moment magnitude of 7.4 [40]. It resulted in 15851 deaths and 43,953 injuries along with estimated 20 billion dollars of economic loss [41-42]. When the epicenter of the earthquake event was within the Kocaeli region (with latitude 40.76 and longitude 29.97 degrees), it was felt quite considerably at neighboring cities including the densely populated city of Istanbul. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** indicates the positions of the stations where the earthquake

input motions were recorded. The changes of PGAs with the epicentral distance are plotted in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** along with the empirical models of Campell [43], Idriss [44] and Ulusay [45]. It is clear that only a single recorded PGA is

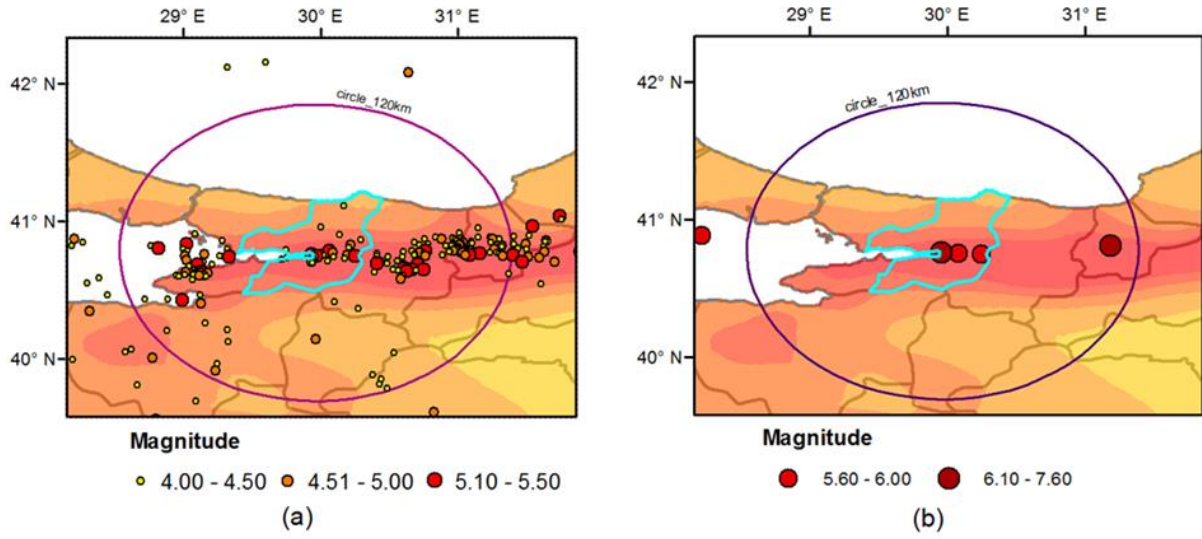


Figure 3. Past earthquake events since 1900 with magnitudes ranging from; (a) 4 to 5.5 and (b) from 5.5 to 7.6

in line with the Campell and Idriss approaches at epicentral distance of 3.4 km. Neither of the three empirical approaches can be able to capture the actual recorded PGAs, at epicentral distances ranging from 36 to 561 km, which are always greater than the empirical predictions. Amongst the empirical approaches, Campell and Idriss formula follows similar linear PGA predictions with distance when Ulusay model predictions are almost same from 1 km to 30 km, then draws parabolic curve with decreasing pattern. This prediction pattern of Ulusay model leads to closer matches with the actual recordings at distances from 30 to 150 km.

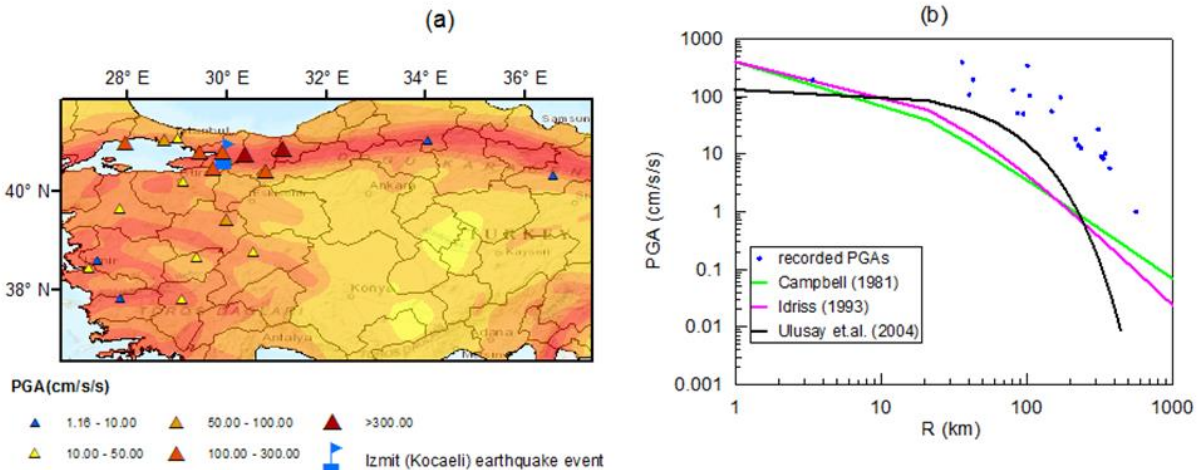


Figure 4. (a) Location of the Izmit (Kocaeli) earthquake event and positions of the accelerogram stations recorded, (b) the change of PGAs with distance compared with empirical approaches

Acceleration-time histories of the input motions of the Kocaeli earthquake event are represented in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**. The input motions are recorded at soil class of B with $V_{s,30}$ of 412 m/s (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.a**), 459 m/s (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.b**) and 662 m/s (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.c**) at the epicentral distances of 35.87 km, 94.66 km and 216.49 km, respectively. It is obvious that the seismic waves reach firstly to the closest station at the distance of 35.87 km. This is followed by the stations at the 94.66 km and 216.49 km epicentral

distances. Moreover, the far the station gets, the less the acceleration values become. This is due to the fact that earthquake energy dissipates with distances within the crusts and soil deposits, as reflected in the recordings of the earthquake event.

Spectral acceleration curves of the input motions recorded at soil classes B and C are represented in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.a**. Spectral acceleration at soil class D is not available since there was not any station positioned on that soil class. Also, spectral acceleration curve for input motion recorded on soil class A is not plotted. Because, only one available recording at soil class A has an epicentral distance of 3.35 km. Therefore, it is thought that this recording may possess near-fault effect.

The input motion with closer epicentral distance (i.e. $R=40$ km) to the earthquake event has larger spectral accelerations. At farther distances of 94.66 km and 216.49 km, the values become less. concerning the site effect, a clear spectral amplification at periods between 1.2 s and 1.5 s is observed in the recorded input motion at soil class C. In contrast, the two recordings at soil class B exhibit spectral amplifications at relatively early periods (i.e. less than 1 s). This is clearly reflected in the PGA normalized spectral acceleration curves illustrated in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.b**.

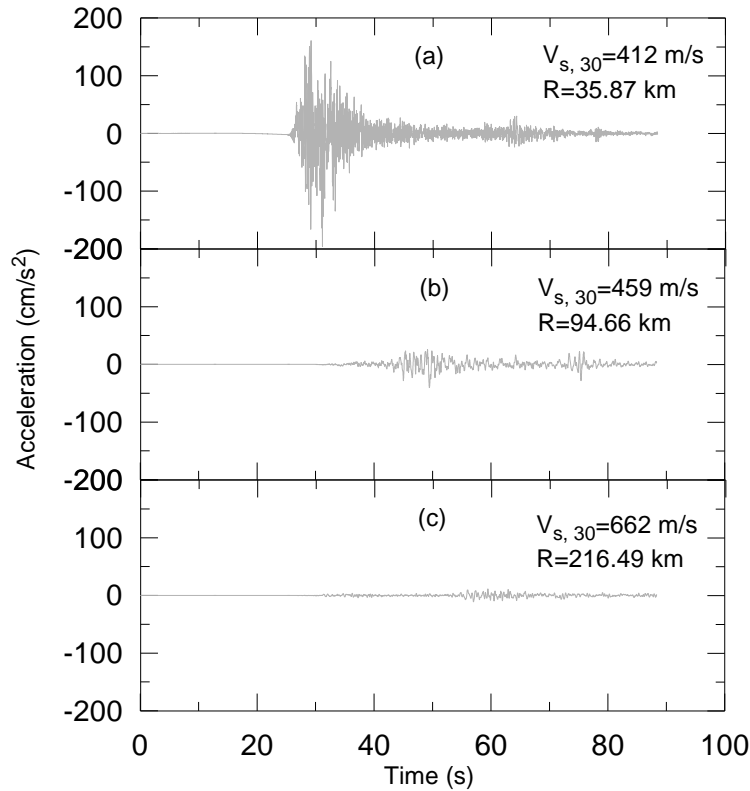


Figure 5. Acceleration-time histories of three input motions of the Kocaeli earthquake event recorded at the same soil class of B with different epicentral distances

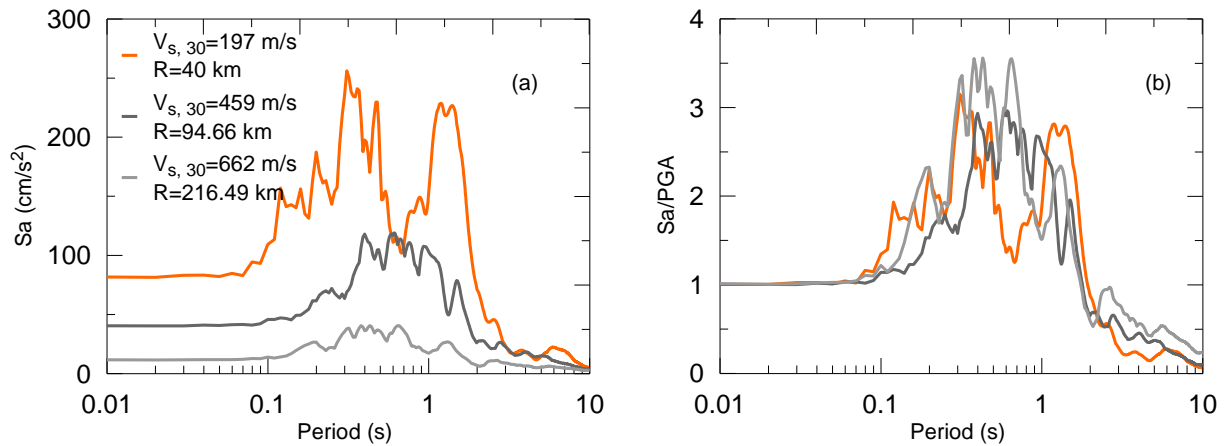


Figure 6. Actual and PGA normalised spectral accelerations (a and b, respectively) of the input motions at soil classes B and C

ANALYSES AND DISCUSSIONS

Recorded Spectral Accelerations Along With The Code Design Response Spectra

The recorded input motions are from the earthquake events in Türkiye and are gathered from the website of Disaster and Emergency Management Presidency [46]. The actual spectral accelerations and code given design response spectra for different soil classes are normalized with respect to the PGA values as implemented in the study of Pitilakis et al. [47]. The geometric mean of the 150 actual data recorded at four different soil classes and their 16th and 84th percentiles are exhibited together with the EC8 –Type 1 and TBEC design response spectra (Figure 7). It is clear that the design response spectra given by both codes for soil classes A, B, C and D (Figure 7a-b-c-d, respectively) cover the geometric mean of the actual spectral accelerations. Moreover, TBEC 2018 is capable of representing the 84th percentile of the recorded data for each soil class. While EC8 also reaches same level of plateau, which is 2.5, but it takes place at the longer periods leading to EC8 not being able to cover the 84th percentile of the actual spectral accelerations at the shorter periods. This inefficiency of EC8 design response spectra is particularly obvious in soil classes of A, B and C at period ranges of 0.03-0.15 s, 0.04-0.15 s and 0.04-0.2 s, respectively. In contrast, EC8 design response spectra becomes better proxy than the TBEC ones at period ranges of 0.2-2.5 s for soil class A, 0.28-2.5 s for soil class B, 0.4-2.3 s for soil class C and 0.5-2.4 s for soil class D. The extension of the plateau from soil class A to soil class D is seen in both design response spectra and in the recorded data, as can be interpreted in Table 3. This is due to the fact that when the soil gets softer, the seismic energy of the input motions is shifted to the longer periods.

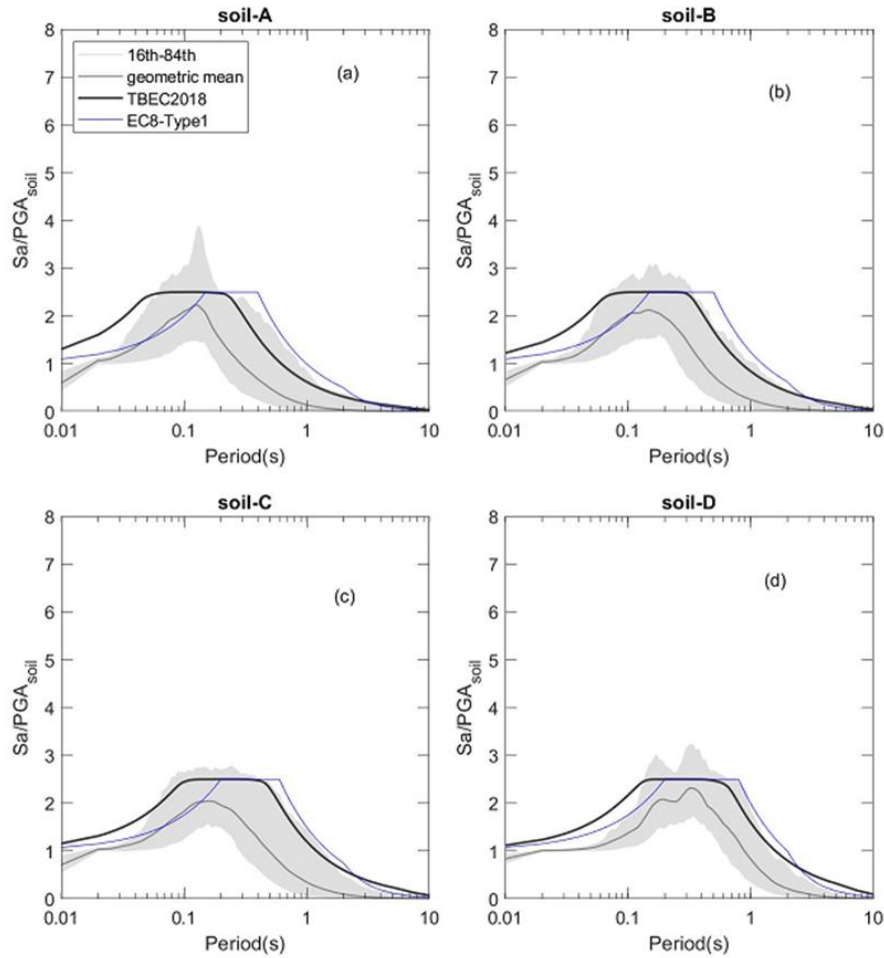


Figure 7. Normalised real spectral accelerations with their geometric mean and 16th-84th percentiles along with the design response spectra guided by TBEC 2018 and EC8

Table 3. The corner periods for different soil classes proposed by EC8 And TBEC 2018 and the extent of the plateau (T_B-T_A)

Soil class	EC8				TBEC 2018			
	A	B	C	D	A	B	C	D
T_A	0.15	0.15	0.20	0.20	0.055	0.07	0.10	0.14
T_B	0.40	0.50	0.60	0.80	0.21	0.30	0.40	0.53
T_B-T_A	0.25	0.35	0.40	0.60	0.155	0.23	0.30	0.39

Building Models

In order to better demonstrate the disparity between the EC8 and TBEC design response spectra and actual spectral acceleration curves, two reinforced concrete (RC) buildings are modelled in ETABS software [48]. 4 and 8 storey building models are formed and analyzed through response spectrum analyses based on linear elastic approach. Since the objective of building analyses is to illustrate the discrepancies between the aforementioned response spectrum curves, selection of a set of input motions in compliance with the spectral curves is not needed. Behavior and overstrength factors are assigned as 8 and 3, respectively. The overall height of the models with 4 and 8 storeys are 13.1 m and 25.9 m, respectively. The periods for the first three modes of 4 storey building model are 0.35 s, 0.28 s and 0.218 s and they are equal to 0.582 s, 0.566 s and 0.36 s for 8 storey building model, as seen in Table 4. Corresponding spectral acceleration values are also demonstrated in Tables 5 and 6 for 4 and 8 storey building models, respectively. The first 12 modes of the models are considered assuring the mass

participations of over %95. The modal responses are combined by using square root of sum of squares (SRSS) method.

Table 4. Periods of the building models at different modes and associated mass participation ratios

Mode Number	Period (s)	Mass Participation (for 4 storey building)		Period (s)	Mass Participation (for 8 storey building)	
		X direction	Y direction		X direction	Y direction
1	0.35	0.8033	0	0.582	0.7637	5.08E-07
2	0.281	0	0.8099	0.566	7.98E-07	0.7148
3	0.218	0.0001	0.0003	0.361	9.26E-07	0.0387
4	0.107	0.1359	0	0.177	0.1257	1.31E-06
5	0.093	0	0.1395	0.167	2.44E-06	0.1289
6	0.071	3.86E-06	2.02E-05	0.108	7.42E-06	0.0035
7	0.055	0.049	0	0.089	0.0554	0
8	0.051	0	0.0418	0.081	0	0.0558
9	0.038	0	1.37E-06	0.054	0.0277	0
10	0.036	0.0118	0	0.051	0	0.0007
11	0.036	0	0.0086	0.049	0	0.0283
12	0.026	0	0	0.038	0.0156	0
Sum		1	1		0.988	0.970

Table 5. Spectral acceleration values at periods of first three modes for 4 storey building model

Mode number	Period (s)	Sa values (in g)											
		TBEC Soil class				EC8 Soil class				Actual Soil class			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Mode 1-X direction	0.35	0.67	1.21	1.38	1.63	1.12	1.35	1.29	1.52	0.31	0.77	0.85	1.55
Mode 2-Y direction	0.28	0.82	1.31	1.38	1.63	1.12	1.35	1.29	1.52	0.40	0.98	1.01	1.19
Mode 3-Torsional	0.218	0.93	1.32	1.38	1.63	1.12	1.35	1.29	1.52	0.52	1.10	1.12	1.14

Table 6. Spectral acceleration values at periods of first three modes for 8 storey building model

Mode number	Period (s)	Sa values (in g)											
		TBEC Soil class				EC8 Soil class				Actual Soil class			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Mode 1-Y direction	0.58	0.41	0.77	1.14	1.58	0.77	1.16	1.29	1.52	0.15	0.38	0.52	1.88
Mode 2-X direction	0.566	0.42	0.79	1.16	1.59	0.79	1.19	1.29	1.52	0.15	0.40	0.53	1.80
Mode 3-torsional	0.36	0.66	1.19	1.38	1.63	1.12	1.35	1.29	1.52	0.30	0.75	0.84	1.53

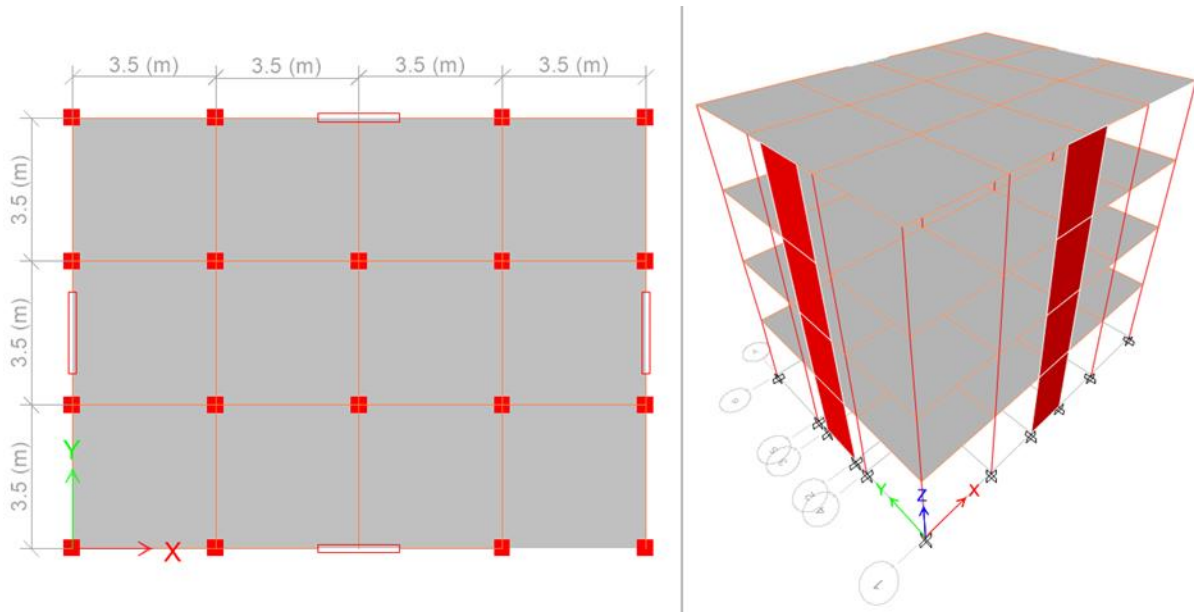


Figure 8. The plan and three-dimensional views of the 4 storey building model

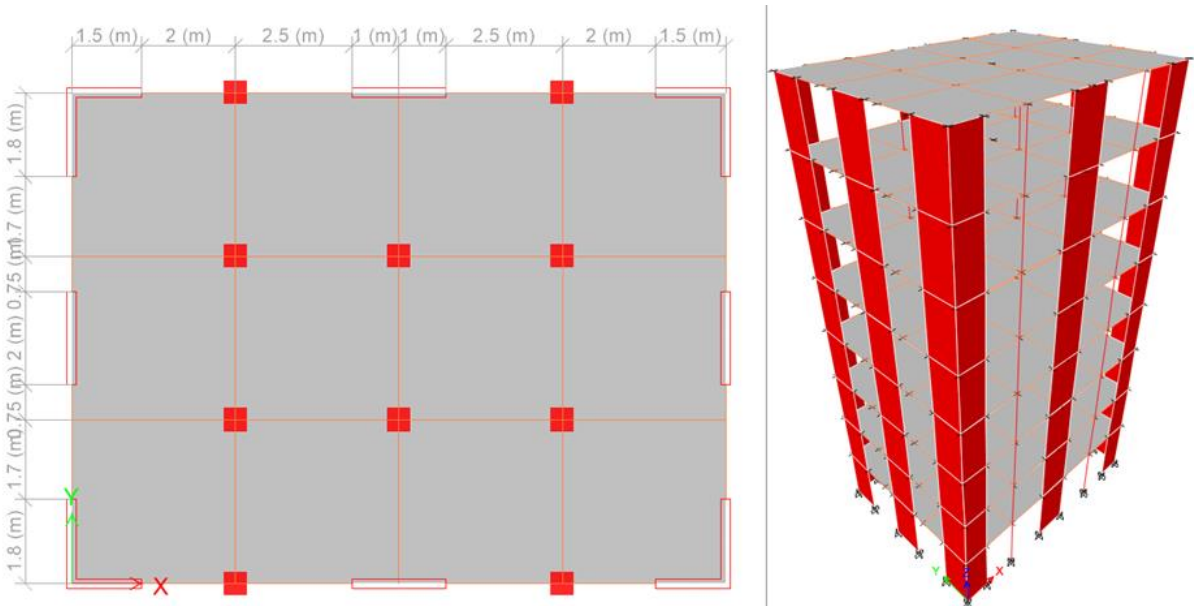


Figure 9. The plan and three-dimensional views of the 8 storey building model

The plan and three dimensional views of 4 and 8 storey buildings are demonstrated in Figs. 8 and 9, respectively. For both building models, 2 kN/m^2 live loads and 7.7 kN/m^2 dead loads are assigned. Compressive strength of concrete and yield strength of rebar is equivalent to 30 MPa and 420 MPa , respectively. The models are regarded as residential buildings, hence the importance factor is taken as 1. All the structural elements (i.e. columns, beams, shear walls, slabs) are designed in accordance with the TBEC guidance.

The shear walls and slabs thicknesses through all storeys of both building models are equal to 20 cm and 18 cm , respectively. The length of shear wall sections in the 4 storey building model is 2 m . In the 8 storey building model, corner shear walls has sectional length of 1.5 m in the x direction and 1.8 m in the y direction when the shear walls in the middle of the facades has sectional length of 2 m . The detailed section properties of the beams and columns are summarized in Table 7 and Table 8.

Table 7. Sizes of columns at different storey levels for the 4 and 8 storey building models including reinforcement rebars (reinf.)

Model's name	Storey level	Column size	reinf	Explanations
4 storeys	1-3	60×60	22Φ20	Columns connected to shear walls in the y direction
		50×50	20Φ20	The remaining columns
	4	40×40	16Φ20	All columns
8 storeys	1-3	65×65	24Φ20	Outer columns
		60×60	22Φ20	Inner columns
	4-7	60×60	22Φ20	Outer columns
		50×50	20Φ20	Inner columns
	8	50×50	20Φ20	Outer columns
		40×40	16Φ20	Inner columns

Table 8. The beam sizes at different storey levels and at different connections for the 4 and 8 storey building models including top and bottom reinforcement rebars (reinf.)

Model's name	Storey level	Beam size	Top reinf	Bot reinf	Explanations
4 storeys	1-5	30×50	3Φ20	3Φ20	All column to column connections and column to shear wall connections in the x direction
	1-3	40×60	4Φ20	4Φ20	Column to shear wall connections in the y direction
			3Φ20	3Φ20	
8 storeys	1-5	40×60	4Φ20	4Φ20	Column to shear wall and shear wall to shear wall connections
	6-8	30×50	4Φ20	4Φ20	Column to column connections
	1-8	30×50	3Φ20	4Φ20	

Results of Response Spectrum Analyses

Figure 10 and Figure 11 exhibit the resulting shear forces acted on different storey levels of building models obtained from response spectrum analyses. In each figure represented in this section, subsections (a), (b), (c) and (d) contain the shear forces attained by considering soil classes A, B, C and D design response spectra of associated codes or actual earthquake data. The shear forces at the 4 storey building model obtained by using the EC8 design response spectra are greater than the shear forces from the TBEC or actual response spectra when class A soil deposit is considered (Figure 10a). At soil class B (Figure 10b), the EC8 design response spectrum results in slightly larger shear forces than the TBEC ones. Specifically, the shear forces for these two design codes are 1342 kN and 1250 kN, respectively. At soil classes of C and D (Figs. 10c-d), the TBEC design response spectra give bigger shear forces than EC8 ones and are equal to 1283 kN and 1380 kN at soil class C and 1506 kN and 1597 kN at soil class D, correspondingly. In contrast, at all soil classes, the actual spectral response curves give relatively smaller values, being 369 kN, 869 kN, 922 kN and 1372 kN at soil classes A, B, C and D, accordingly.

Similar patterns in the shear forces according to the different spectral acceleration curves are observed when the 8 storey building model is analyzed, as seen in Figure 11. The shear forces from the EC8 design response spectra are 1302 kN and 2008 kN at soil classes A and B, respectively (Figs. 11a-b). At the same soil classes, the shear forces are 742 kN and 1340 kN with the use of the TBEC design response spectra. The similarities of shear forces from the EC8 and TBEC design response spectra are pronounced, more clearly, at soil classes of C and D (Figs. 11c-d). At all soil classes, the actual response spectra conclude the minimum shear forces on the building model. The shear forces from the actual

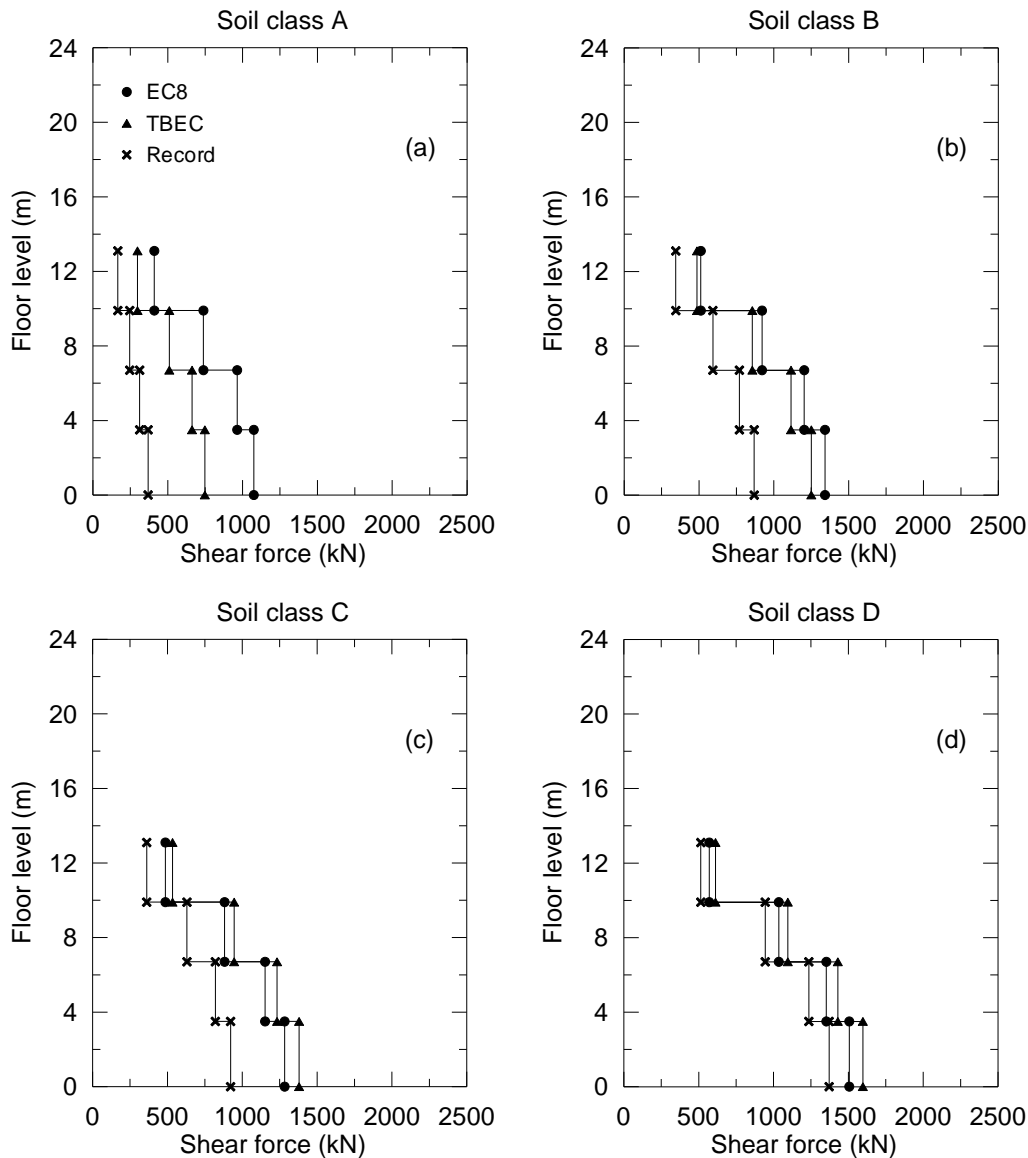


Figure 10. Shear force distributions, along the 4 storey building model, from the building analyses conducted by considering the EC8, TBEC design response spectra and actual spectral response curves at different soil classes

response spectra are 303 kN at soil class A, 684 kN at soil class B, 857 kN at soil class C and 2084 kN at soil class D. This can be attributed to the fact that the spectral acceleration value of actual spectral spectrum at around the fundamental period of the 8 storey (and also 4 storey) building model is lower than the EC8 and TBEC design response spectra, indicating the lower shear forces. This clearly reflects the direct relation between the spectral acceleration and the building response. Therefore, the spectral acceleration is always considered to be better proxy regarding the involvement of earthquake effect in the seismic design/retrofitting of building structures.

Regardless of which type of design response spectrum considered, the shear forces acted on the building models are always increasing with the soil becoming softer (i.e. from A to D), as can be depicted from Table 9. For instance, the 4 storey building model is forced by 1075 kN when the EC8 design response spectrum for soil class A is taken into consideration. This value is equal to 1342 kN, 1283 kN and 1506 kN on soil classes B, C and D, respectively. In the same way, concerning the shear forces on the 8 storey building model in accord with the TBEC design response spectra, it is 742 kN, 1340 kN, 1965 kN and 2634 kN when the building model positioned on top of soil classes A, B, or D, correspondingly. Likewise, as the actual response spectrum is used, 303 kN, 684 kN, 857 kN and 2084

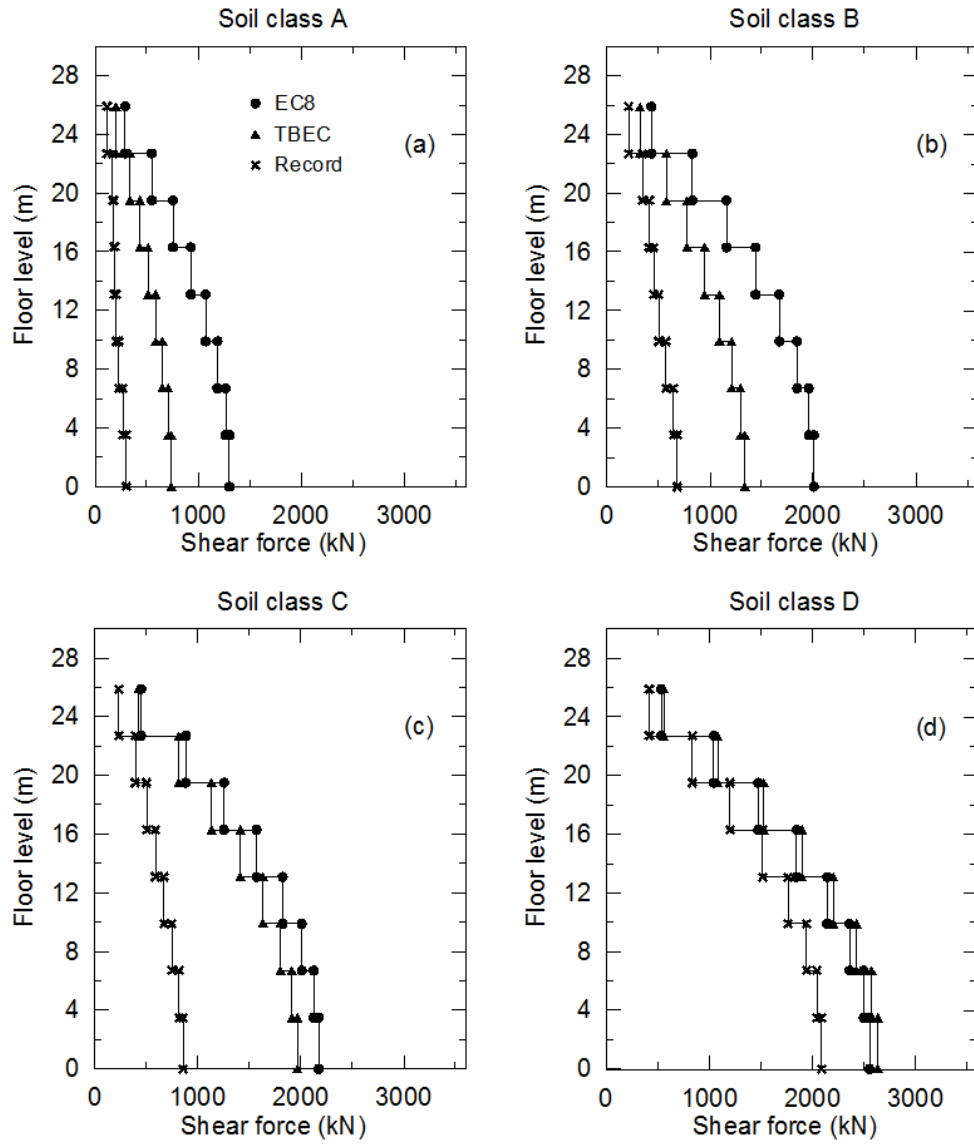


Figure 11. Shear force distributions, along the 8 storey building model, from the building analyses conducted by considering the EC8, TBEC design response spectra and actual spectral response curves at different soil classes

kN shear forces are imposed to the 8 storey building model if it is located on soil classes of A, B, C or D, appropriately.

Table 9. Total shear forces (in kN) acted on 4 and 8 storey building models when EC8, TBEC or actual spectrum applied at different soil classes

Storey number	Code name	Soil class			
		A	B	C	D
4	EC8	1075	1342	1283	1506
	TBEC	748	1250	1380	1597
	Actual	369	869	922	1372
8	EC8	1302	2008	2174	2552
	TBEC	742	1340	1965	2634
	Actual	303	684	857	2084

CONCLUSIONS

This work, firstly, concentrates on the seismicity of the Kocaeli region and the input motion recordings of the Kocaeli earthquake event related to the site effect. Following that, the design response spectra given by two seismic design codes, TBEC 2018 and EC8, are explained. The code given design response spectrum for each seismic soil class is compared with the spectral accelerations of actual earthquake input motions recorded across Türkiye. Then, the applications of the TBEC 2018 and EC8 design response spectra (as well as the actual response spectra) to the 4 and 8 storey building models are illustrated by locating the building models in different soil classes. The building models are analyzed by means of ETABS software based on the response spectrum analysis method. The main conclusions of the research are as follows:

- The earthquake input motions are significantly influenced by the characteristics of the soil deposits. Therefore, it is always beneficial to conduct site-specific response analysis when a soft soil deposit (i.e., soil classes of C and D) is available.
- The spectral response spectra of the actual input motions recorded at all soil classes are well captured by the design response spectra of both codes.
- At all soil classes, the EC8 design response spectra have plateau starting at relatively longer periods than the TBEC design response spectra. The second corner periods of the plateau at the EC8 design response spectra always greater than that of the TBEC design response spectra, especially for soil classes A and B.
- This results in the EC8 design response spectrum at each soil class owning wider plateau than the TBEC design response spectrum.
- The building model analyses also reflect that the actual spectral acceleration curves results in smaller shear forces, followed by TBEC and then EC8 design response spectra at the same soil type.
- As expected, the softer the soil(from A to D), the greater the shear forces acting on the building models.

Acknowledgements

Authors declare that there is no funds, grants or any other support received during the preparation of the manuscript.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship Contribution Statement

Y.G.: Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing - Review & Editing, **F.G.:** Formal Analysis, Investigation, Methodology, Writing - Original Draft

REFERENCES

- [1] I. Iervolino, G. Manfredi, A Review of Ground Motion Record Selection Strategies for Dynamic Structural Analysis, In: Bursi, OS, Wagg D (eds.) *Modern Testing Techniques for Structural Systems*, Springer Science & Business Media, 2008, 131-163
- [2] C. Galasso, I. Iervolino, Relevant and minor criteria in real record selection procedures based on spectral compatibility, *XIV Convegno Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica ANIDIS*, Bari, Italy, 2011.
- [3] S.L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall International Limited, London, UK, 1996.
- [4] D. Gautam, G. Forte, H. Rodrigues, Site effects and associated structural damage analysis in Kathmandu Valley, Nepal, *Earthquake and Structures*. 10(5) (2016), 1013-1032. doi:10.12989/eas.2016.10.5.1013
- [5] A. Sextos, R. De Risi, A. Pagliaroli, et al., Local site effects and incremental damage of buildings during the 2016 Central Italy Earthquake sequence, *Earthquake Spectra*. 34(4) (2018), 1639-1669. doi:10.1193/100317EQS194M
- [6] A. Akinci, D. Chelon, A.A. Dindar, The 30 October 2020, M7.0 Samos Island (Eastern Aegean Sea) Earthquake: effects of source rupture, path and local-site conditions on the observed and simulated ground motions, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 19(12) (2021), 4745-4771. doi:10.1007/s10518-021-01146-5
- [7] G. Forte, E. Chioccarelli, M. De Falco, P. Cito, A. Santo, I. Iervolino, Seismic soil classification of Italy based on surface geology and shear-wave velocity measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 122 (2019), 79-93. doi:10.1016/j.soildyn.2019.04.002
- [8] L.F. Sá, A.Morales-Esteban, P.D. Neyra, A deterministic seismic risk macrozonation of Seville, *Arabian Journal of Geosciences*. 14(22) (2021), 1-21. doi:10.1007/s12517-021-08626-7
- [9] N.A. Abrahamson, W.J. Silva, Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seismological Research Letters*. 68(1) (1997), 94–127.
- [10] D.M. Boore, W.B. Joyner, T.E. Fumal, Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work, *Seismological Research Letters*. 68(1) (1997), 128–153. doi:10.1785/gssrl.76.3.368
- [11] K.W. Campbell, Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in eastern North America, *Bulletin of Seismological Society of America*. 93(3) (2003), 1012–1033. doi:10.1785/0120020002
- [12] N.N. Ambraseys, J. Douglas, S.K. Sarma, P.M. Smit, Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 3(1) (2005), 1–53. doi:10.1007/s10518-005-0183-0
- [13] I.M. Idriss, An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*. 24(1) (2008), 217–242. doi:10.1193/1.2924362
- [14] R.D. Borcherd, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), *Earthquake spectra*. 10(4) (1994), 617-653. doi:10.1193/1.1585791
- [15] R.D. Borcherdt, G. Glassmoyer, On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 82(2) (1992), 603-641. doi:10.1785/BSSA0820020603
- [16] C. Comina, S. Foti, D. Boiero, L.V. Socco, Reliability of $V_{s,30}$ evaluation from surface-wave tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 137(6) (2011), 579-586. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000452

- [17] K. Pitilakis, D. Raptakis, K. Lontzetidis, T. Tika-Vassilikou, D. Jongmans, Geotechnical and geophysical description of euro-seistest, using field, laboratory tests and moderate strong motion recordings, *Journal of Earthquake Engineering*. 3(3) (1999), 381-409. doi:10.1080/13632469909350352
- [18] S. Fabbrocino, G. Lanzano, G. Forte, F.S. de Magistris, G. Fabbrocino, SPT blow count vs. shear wave velocity relationship in the structurally complex formations of the Molise Region (Italy), *Engineering Geology*. 187 (2015), 84-97. doi:10.1016/j.enggeo.2014.12.016
- [19] J.A. Blume, R. Sharpe, J.S. Dalal, J.A. Blume, Recommendations for shape of earthquake response spectra, Rep. No. WASH-1254, John A. Blume and Associates, Washington DC, 1973.
- [20] N.M. Newmark, J.A. Blume, K.K. Kapur Seismic design spectra for nuclear power plants. *Journal of the Power Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, 99(PO2) (1973)
- [21] M.D. Trifunac, Early history of the response spectrum method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 28(9) (2007), 676-685. doi:10.1016/j.soildyn.2007.10.014
- [22] American Society of Civil Engineers, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, 2017.
- [23] CEN (2005), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance–Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [24] Turkish Building Earthquake Code, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar*, Ankara, Turkey, 2018.
- [25] W. Wen W, D. Ji, C. Zhai, X. Li, P. Sun, Damage spectra of the mainshock-aftershock ground motions at soft soil sites, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 115 (2018), 815-825. doi:10.1016/j.soildyn.2018.08.016
- [26] Y. Guzel, Influence of input motion selection and soil variability on nonlinear ground response analyses, (PhD), Newcastle University, UK, 2019.
- [27] E. Yao, W. Li, Y. Miao, L. Ye Z. Yang, Study on the Influence of a Soft Soil Interlayer on Spatially Varying Ground Motion, *Journal of Applied Sciences*. 12(3) (2022), 1322. doi:10.3390/app12031322
- [28] J. Rey, E. Faccioli, J.J. Bommer, Derivation of design soil coefficients (S) and response spectral shapes for Eurocode 8 using the European Strong-Motion Database, *Journal of Seismology*. 6(4) (2002), 547-555.
- [29] G. Pousse, C. Berge-Thierry, L.F. Bonilla, P.Y. Bard, Eurocode 8 design response spectra evaluation using the K-net Japanese database, *Journal of Earthquake Engineering*. 9(4) (2005), 547-574. <http://doi.org/10.1080/13632460509350555>.
- [30] K. Pitilakis, E. Riga, A. Anastasiadis, Design spectra and amplification factors for Eurocode 8, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 10(5) (2012), 1377-1400. <http://doi.org/10.1007/s10518-012-9367-6>.
- [31] K. Pitilakis, E. Riga, A. Anastasiadis, Towards the revision of EC8: Proposal for an alternative site classification scheme and associated intensity-dependent amplification factors. In 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September, 2020.
- [32] H.P. Gülkan, V.H. Akansel, E. Kalkan, Response spectrum shapes implied by earthquakes in Turkey: comparisons with design spectra, *Journal of Seismology*. 27(4) (2023), 681-692.
- [33] V.H. Akansel, F. Soysal, K. Kadaş, P. Gülkan, Spektrum şiddeti perspektifinden 2018 Türkiye deprem tehlike haritası değerlendirmesi, *Türk Deprem Araştırma Dergisi*. 2(2) (2020), 115-137.
- [34] A. Bozer, Tasarım spektral ivme katsayılarının DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre karşılaştırması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*. 11(1) (2020), 393-404.

- [35] C. Scawthorn, G.S. Johnson, Preliminary report: Kocaeli (Izmit) earthquake of 17 August 1999, *Engineering Structures*. 22(7) (2000), 727-745. doi:10.1016/S0141-0296(99)00106-6
- [36] Turkish Building Earthquake Code, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar, Ankara, Turkey, 2007.
- [37] C. Rangin, A.G. Bader, G. Pascal, B. Ecevitoglu, N. Görür, Deep structure of the Mid Black Sea High (offshore Turkey) imaged by multi-channel seismic survey (BLACKSIS cruise). *Marine Geology*, 182(3-4) (2002), 265-278. doi:10.1016/S0025-3227(01)00236-5
- [38] F. Bulut, M. Bohnhoff, T. Eken, C. Janssen, T. Kılıç, G. Dresen, The East Anatolian Fault Zone: Seismotectonic setting and spatiotemporal characteristics of seismicity based on precise earthquake locations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 117(B7) (2017). doi:10.1029/2011JB008966
- [39] H. Yavaşoğlu, E. Tarı, O. Tüysüz, Z. Çakır, S. Ergintav, Determining and modeling tectonic movements along the central part of the North Anatolian Fault (Turkey) using geodetic measurements, *Journal of Geodynamics*. 51(5) (2011), 339-343. doi:10.1016/j.jog.2010.07.003
- [40] USGS, Implications for Earthquake Risk Reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999, US Geological Survey Circular 1193.
- [41] M.N. Toksoz, R.E. Reilinger, C.G. Doll, A.A. Barka, N. Yalcin, Izmit (Turkey) earthquake of 17 August 1999: first report, *Seismological Research Letters*. 70(6) (1999), 669-679. doi:10.1785/gssrl.70.6.669
- [42] S. Dalgiç, Factors affecting the greater damage in the Avclar area of Istanbul during the 17 August 1999 Izmit earthquake, *Bulletin of the Engineering Geology and Environment*. 63(3) (2004), 221-232. doi:10.1007/s10064-004-0234-9
- [43] K.W. Campbell, Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, *Bulletin Seismological Society of America*. 71(6) (1981), 2039-2070. doi:10.1785/BSSA0710062039
- [44] I.M. Idriss, Procedures for selecting earthquake ground motions at rock sites, US Department of Commerce: National Institute of Standards and Technology, 1991.45] R. Ulusay, E. Tuncay, H. Sonmez, C. Gokceoglu, An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey, *Engineering Geology*. 74(3-4) (2004), 265-291. doi:10.1016/J.ENGGEOL.2004.04.002
- [46] Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) (2023). Web page for earthquake data in and around Turkey. <https://deprem.afad.gov.tr/ddakatalogu/> last accessed 15.01.2023.
- [47] K. Pitilakis, E. Riga, A. Anastasiadis, New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 11(4) (2013), 925-966. doi:10.1007/s10518-013-9429-4
- [48] Computers and structures, ETABS: Extended three-dimensional analysis of building systems, Version 9.0, Berkeley, 2018.

Kiral Diazadioksokaliks[2]aren[2]triazin Bazlı Organokatalizörün Nitrostirenler ile Antronun Enantiyoselektif Michael Tepkimesinde Kullanılması

Ümmü ÖZGÜN¹  Hayriye Nevin GENÇ²  Abdulkadir SIRIT³ 

¹ Necmettin Erbakan University, Institute of Science, Department of Chemistry, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan University, Ahmet Keleşoğlu Faculty of Education, Department of Science Education, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan University, Ahmet Keleşoğlu Faculty of Education, Department of Chemistry Education, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 05.11.2023

Kabul Tarihi: 06.01.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

Asimetrik sentez,
Michael reaksiyonu
Organokataliz.

Kiral, stereoseçici ya da enantiyoseçici sentez olarak tanımlanan asimetrik sentez bir veya daha fazla stereojenik merkez bulunduran kiral bileşiklerin sentezlenmesini sağlayan organik sentez türüdür. Bir molekülün farklı enantiyomerleri genellikle birbirlerinden farklı biyolojik aktivite gösterdiklerinden dolayı, asimetrik sentez konusu ilaç kimyası ve organik kimyada oldukça önemli bir konudur. Kiral özellik göstermeyen bileşiklerden kiral bir bileşik sentezleme yöntemleri arasında en çok tercih edilen yöntemlerden biri kiral katalizör kullanımıdır. Bu çalışmada anthron ve farklı nitrostiren türevlerinin kullanıldığı asimetrik Michael tepkimesinde kullanılmak üzere literatürde bulunmayan bir kiral katalizör sentezlenmiştir. Öncelikle kiral katalizörün başlangıç maddesi olarak literatürde bulunan diazadioksokaliks[2]aren[2]triazin sentezlenmiştir. Sentezlenen başlangıç maddesi ile (S)-(+)-1-siklohekziletilamin tepkimeye sokularak enantiyoselektif tepkime kiral katalizör olarak kullanılacak olan madde elde edilmiştir. Çalışma süresince yapılan tüm reaksiyonlar ince tabaka kromatografisi ile izlenmiş ve elde edilen maddeler kolon kromatografisi ile saflaştırılmıştır. Saflaştırılan ürünler FTIR, ¹H NMR ve ¹³C NMR ile aydınlatılmış ve optik çevirme açıları ölçülmüştür. Sentezlenen katalizör asimetrik Michael reaksiyonunda denenmiş, yüksek verim ve yüksek enantiyoseçicilik elde edilmiştir (%95 verim ve %98 ee).

Chiral Diazadioxocalix[2]arene[2]triazine-Based Derivative as Organocatalyst for Enantioselective Michael Reaction of Nitrostyrenes with Anthrone

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 05.11.2023

Accepted: 06.01.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Asymmetric synthesis,
Michael reaction,
Organocatalysis.

Asymmetric synthesis, also known as chiral, enantioselective or stereoselective synthesis, is an organic synthesis which allows the formation of chiral compounds containing one or more stereogenic centers. Since different enantiomers of a molecule usually show different biological activity from each other, asymmetric synthesis is a very important topic in the pharmaceutical industry and organic chemistry. One of the most preferred methods to obtain a chiral compound from non-chiral compounds is the use of chiral catalysts. In this study, a chiral catalyst, which is not available in the literature, was synthesized for use in the asymmetric Michael reaction using anthrone and different nitrostyrene derivatives. First, diazadioxocalix[2]arene[2]triazine, which is available in the literature, was synthesized as the starting material of the chiral catalyst. (S)-(+)-1-cyclohexylethylamine was reacted with the synthesized starting material to obtain the substance to be used as a chiral catalyst in the enantioselective reaction. During the study, all reactions were monitored by thin layer chromatography and the obtained substances were purified by column chromatography. The structures of the purified products were elucidated by FTIR, ¹H NMR and ¹³C NMR techniques and optical rotation angles were measured. The synthesized catalyst was tested in asymmetric Michael reaction and high yields and high enantioselectivity were obtained (95% yield and 98% ee).

To cite this article:

Özgün, Ü., Genç, H.N. & Sirit, A. (2024). Chiral diazadioxocalix[2]arene[2]triazine-based derivative as organocatalyst for enantioselective Michael reaction of nitrostyrenes with anthrone, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 58-68. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.32>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hayriye Nevin Genç, hngenc@erbakan.edu.tr



INTRODUCTION

Chiral compounds play an important role in biochemical systems, pharmaceuticals, organic synthesis and many chemical applications. These compounds are used in various analytical, synthetic and industrial applications due to their optically active properties [1-5]. The stereoselective synthesis of chiral substances is becoming increasingly important due to their applications in the pharmaceutical industry. Among the methods of obtaining a chiral compound from non-chiral compounds, the use of chiral catalysts has a number of advantages over other methods. The number of studies on the synthesis of chiral catalysts and their use in reactions is increasing day by day [6-10].

Chiral compounds can generally be synthesized by four different strategies. The use of chiral catalysts and optical resolution are important among them. Optical resolution is realized by the consumption of only one enantiomer of a racemic compound by microorganisms or by converting it into a diastereoisomeric salt by interacting with a chemical containing a single enantiomer [11-12]. The use of a chiral catalyst has become one of the most preferred effective methods by researchers; it is a strategy to obtain predominantly a stereoisomer by acting on a reaction that normally yields products as racemic mixtures [13-14].

Since many biological systems contain amine, amino alcohol, carboxylic acid and amino acid groups, the enantiomeric recognition of these compounds is of particular importance. Such studies contribute to the understanding of the function of natural living systems and provide useful information for the design of asymmetric catalysis systems and new drugs [15-17].

In recent years, we have reported the synthesis of substituted calix[2]arene[2]triazine bearing various chiral subunits, their use as chiral organocatalysts in different stereoselective reactions and their catalytic activities [18-21].

In this paper, the synthesis of a chiral diazadioxocalix[2]arene[2]triazine derivative from (S)-(+)-1-cyclohexylethylamine and its catalytic application in the Michael reaction between anthrone and various aromatic nitrostyrenes were described. To the best of the authors' knowledge, the catalytic application of the diazadioxocalix[2]arene[2]triazine derivative in the asymmetric Michael reaction of anthrone with various nitrostyrenes is reported for the first time.

MATERIALS AND METHODS

Synthesis and Use of Catalyst

Heteroatom bridged diazadioxocalix[2]arene[2]triazine was synthesized in accordance with the procedure published by Wang et al. [22-23].

Procedure for the Synthesis of 2

To the obtained solution of diazadioxocalix[2]arene[2]triazine (1) (0.5 mmol) in tetrahydrofuran (20 mL) was added the solution of (S)-(+)-1-cyclohexylethylamine (1.1 mmol) and N,N-Diisopropylethylamine (2.2 mmol) prepared in tetrahydrofuran (20 mL). The reaction mixture was refluxed for 28 h and then THF was removed. Finally, the product was purified by flash chromatography (Hexane/EtOAc).

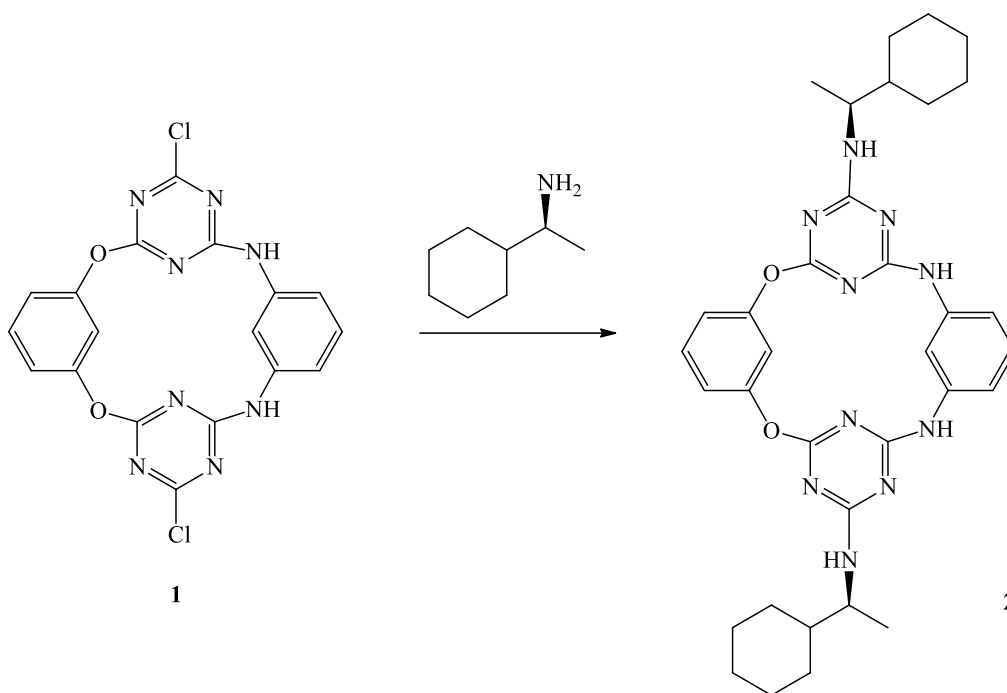


Figure 1. The synthesis of chiral catalyst **2**

(2): Crystalline Solid; 74% yield; $[\alpha]_D^{25} = -14.45$ ($c=1.0$, CHCl_3); mp.: 311-313 °C; FTIR (cm^{-1}): 3270, 2973, 1579, 1484, 1378; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 7.94-7.78 (m, 4H, ArH), 7.62-7.51 (m, 2H, ArH), 7.43-7.35 (m, 2H, ArH), 4.21-3.93 (m, 2H, methyl-CH-NH), 1.62-1.54 (m, 10H, cyclohexyl H), 1.46 (d, $J=7.8$, 6H, methyl H), 1.44-1.29 (m, 12H, cyclohexyl H), NH-signals not found; ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 165.72, 163.20, 159.82, 157.93, 137.18, 132.13, 127.83, 118.53, 117.52, 110.10, 103.18, 59.35, 52.63, 40.92, 29.15, 25.85, 20.85$; Anal. Calcd. for $\text{C}_{34}\text{H}_{42}\text{N}_{10}\text{O}_2$ (622.77): C, 65.57; H, 6.80; N, 22.49%. Found: C, 65.73; H, 6.61; N, 22.60%.

Procedure for 5a-5j

To a solution of nitrostyrene derivatives (**4a-j**) (0.4 mmol) and catalyst **2** (10% mol) in toluene (4 mL) was added anthrone (**3**) (0.48 mmol). The reactions were stirred at room temperature for a certain time and monitored by TLC. The completed reaction mixtures were concentrated. The residues were purified by column chromatography (**5a-j**). The obtained products were compared with the literature [24-25]. The *ee* of the pure products was determined by HPLC using chiral columns and compared with the reported data. Non-chiral catalysts were used for the preparation of racemic Michael products.

5a [24]: White solid, yield 95%; *ee* 95%, $[\alpha]_D^{25} = +25.0$ (c 0.5, CHCl_3); mp.: 145°C-147°C; HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 90/10; 254 nm; 0.7 mL/min; t_R major: 16.55, minor: 19.45.

5b [25]: White solid, yield 85%; *ee* 93%, $[\alpha]_D^{25} = -4.5$ (c 0.2, CHCl_3); mp.: 68°C-70°C; HPLC (OD-H); Hexane/ IPA: 70/30; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 15.25, minor: 18.02.

5c [25]: White solid, yield 93%; *ee* 89%, $[\alpha]_D^{25} = -8.7$ (c 0.9, CHCl_3); mp.: 128°C-130°C; HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 80/20; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 11.75, minor: 14.72.

5d [25]: White solid, yield 92%; *ee* 96%, $[\alpha]_D^{25} = +6.7$ (c 0.7, CHCl_3); mp.: 62°C-64°C; HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 80/20; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 10.55, minor: 13.25.

5e [25]: White solid, yield 93%; *ee* 98%, $[\alpha]_D^{25} = +33.7$ (c 0.6, CHCl_3); mp.: 114°C-116°C;

HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 80/20; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 14.68, minor: 17.51.

5f [24]: White solid, yield 88%; *ee* 82%, $[\alpha]_D^{25} = +32.8$ (*c* 0.5, CHCl₃); mp.: 173°C-171°C; HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 70/30; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 10.11, minor: 12.12.

5g [24]: White solid, yield 91%; *ee* 84%, $[\alpha]_D^{25} = +25.2$ (*c* 0.5, CHCl₃); mp.: 166°C-168°C; HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 90/10; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 21.32, minor: 25.52.

5h [24]: White solid, yield 83%; *ee* 90%, $[\alpha]_D^{25} = +17.5$ (*c* 0.7, CHCl₃); mp.: 117°C -118°C; HPLC (OD-H); Hexane/ IPA: 80/20; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 25.42, minor: 20.12.

5i [24]: White solid, yield 92%; *ee* 88%, $[\alpha]_D^{25} = +25.8$ (*c* 0.6, CHCl₃); mp.: 157°C-159°C; HPLC (AS-H); Hexane/ IPA: 90/10; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 15.85, minor: 17.97.

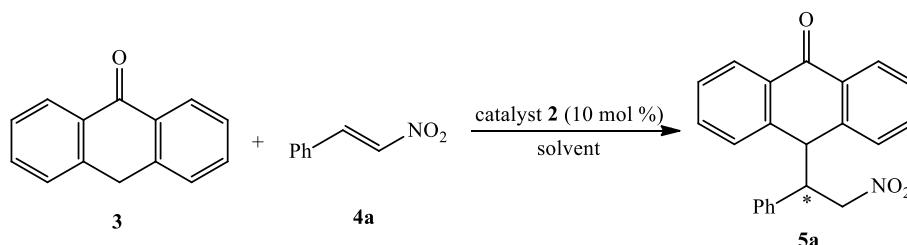
5j [24]: White solid, yield 90%; *ee* 89%, $[\alpha]_D^{25} = -14.7$ (*c* 0.2, CHCl₃); mp.: 66°C-68°C; HPLC (OD-H); Hexane/ IPA: 80/20; 254 nm; 1.0 mL/min; t_R major: 12.84, minor: 16.02.

RESULTS AND DISCUSSION

In order to reach the target molecule, we first prepared diazadioxocalix[2]aren[2]triazine in specific steps using suitable starting materials [22-23]. To synthesize the target molecule, diazadioxocalix[2]aren[2]triazine (**1**), (*S*)-(+)-1-cyclohexylethylamine and N,N-Diisopropylethylamine (DIPEA) were reacted efficiently in THF at room temperature. As a result of this reaction, chiral **2** shown in Figure 1 was obtained. The obtained material was characterized by methods such as FTIR, ¹H NMR and ¹³C NMR.

The infrared spectra of catalyst **2** have been recorded and analyzed. The NH stretching modes of catalyst were observed in the region 3270 cm⁻¹ and C-H stretches were observed in the region 2973 cm⁻¹. Additionally, the observed band at 1579 cm⁻¹ in the FT-IR spectrum was assigned to the aromatic C=N and band at 1484 cm⁻¹ was assigned to the aromatic C=C stretching modes.

Table 1. Michael Addition Reaction **3** and **4a** with Catalyst **2** in Different Solvents



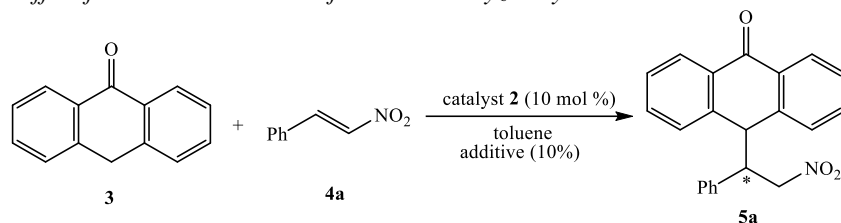
Entry ^a	Solvent	Time (d)	Yield (%)	<i>ee</i> (%) ^{b, c}
1	THF	4	91	91
2	Toluene	4	95	95
3	CH ₃ CN	2	93	89
4	CCl ₄	4	90	87
5	1,4-dioxane	4	87	86
6	DMF	2	85	81
7	Et ₂ O	4	93	92
8	CHCl ₃	4	92	92
9	Acetone	2	92	90
10	CH ₂ Cl ₂	3	93	91
11	<i>i</i> -PrOH	2	88	89

^a Conditions: **3** (0.48 mmol), **4** (0.40 mmol) and **2** (10 mol%) in solvents (4.0 mL). ^b Results were determined using HPLC. Configuration and retention time were determined by comparison with the literature data. ^c All products obtained in *R* configuration.

The obtained diazadioxocalix[2]arene[2]triazine-based compound was used as a catalyst in Michael addition, which is an enantioselective reaction, in order to learn the catalytic activity of catalyst

2. The reaction of *trans*- β -nitrostyrene with anthrone was shown in Table 1. The synthesized catalyst **2** was tested in this reaction, and the results obtained were reported in Table 1. Various solvents were tested to determine the most suitable solvent to be used in Michael addition. The highest yield and enantiomeric excess were obtained in the presence of toluene (entry 2).

Table 2. Additive Effect for Michael Addition of **3** to **4a** Catalyzed by **2**



Entry ^a	Additive	Time (d)	Yield (%)	ee (%) ^{b, c}
1	None	4	95	95
2	DMAP	4	93	89
3	AcOH	4	85	88
4	PhCOOH	4	84	90
5	Pyridine	4	92	88
6	<i>p</i> -TsOH	4	83	90

^a Conditions: **3** (0.48 mmol), **4** (0.40 mmol), additive (10 mol%) and **2** (10 mol%) in toluene (4.0 mL). ^b Results were determined using HPLC. Configuration and retention time were determined by comparison with the literature data. ^c All products obtained in *R* configuration.

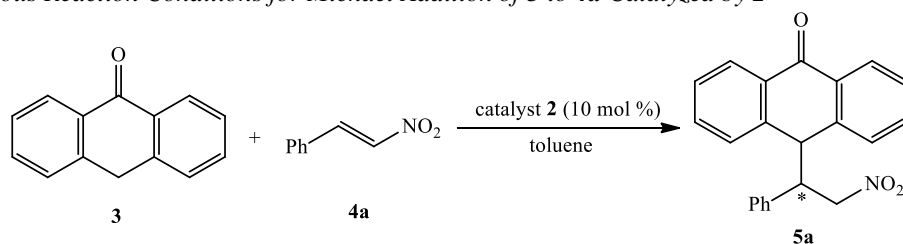
The same reaction was carried out at -20 °C and 0°C with toluene, as shown in Table 3. However, both the yield and enantiomeric excess were found to decrease. The experiments revealed that room temperature was the ideal temperature for this process (Table 3, entry 3).

We then added recycled catalyst **2** to the Michael addition and observed the results. The results obtained showed a decrease in yield and enantiomeric excess (Table 3, entry 4).

To investigate the effect of the amount of catalyst on the addition reaction, we added 15 mol% and 5 mol% catalyst to the reaction and observed the results. After these experiments, we decided that the optimum amount of catalyst was 10%. (Table 3, entries 5 and 6).

All our experimental studies have showed that catalyst containing bulky heteroatom bridged calixarene platform is highly effective on enantioselective addition reactions.

Table 3. Various Reaction Conditions for Michael Addition of **3** to **4a** Catalyzed by **2**



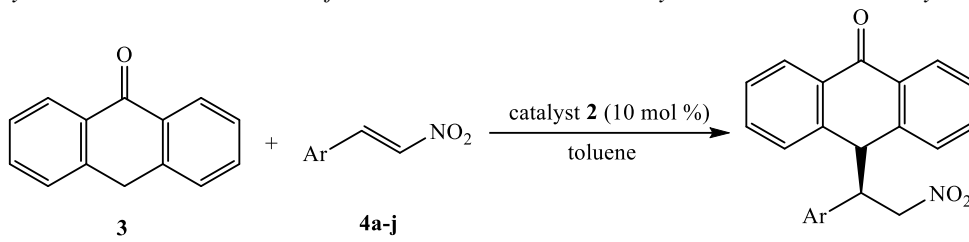
Entry ^a	Temp. (°C)	Time (d)	Yield (%)	ee (%) ^{b, c}
1	-20	5	82	86
2	0	4	85	88
3	r.t.	4	95	95
4 ^d	r.t.	4	90	91
5 ^e	r.t.	4	94	95
6 ^f	r.t.	4	93	93

^a Conditions: **3** (0.48 mmol), **4** (0.40 mmol) and **2** (10 mol%) in toluene (4.0 mL). ^b Results were determined using HPLC. Configuration and retention time were determined by comparison with the literature data. ^c All products obtained in *R* configuration. ^d Recycled catalyst was used in the reaction. ^e 15 mol% catalyst. ^f 5 mol% catalyst.

The results showed that the ideal conditions were toluene as a solvent, 10 mol% catalyst loading, room temperature, reaction time of four days and no additional additives.

The obtained chiral catalyst was used in the Michael reaction of anthrone with aromatic nitrostyrene derivatives under optimized conditions. In the experiments performed with the chiral catalyst **2**, Michael products (**5a-5j**) were obtained with high yield (83%-95%) and excellent enantioselectivity (82%-98%) (Table 4).

Table 4. Asymmetric Michael Reaction of **3** to Various Aromatic Nitrostyrenes with Chiral Catalyst **2**



Entry ^a	Ar	Time (d)	Product	Yield (%)	ee (%) ^{b, c}
1	C ₆ H ₅	4	5a	95	95
2	2-NO ₂ -C ₆ H ₄	3	5b	85	93
3	2-CH ₃ O-C ₆ H ₄	3	5c	93	89
4	2-Br-C ₆ H ₄	2	5d	92	96
5	3-Br-C ₆ H ₄	2	5e	93	98
6	4-F-C ₆ H ₄	4	5f	88	82
7	4-Cl-C ₆ H ₄	4	5g	91	84
8	4-CH ₃ O-C ₆ H ₄	3	5h	83	90
9	4-Me-C ₆ H ₄	3	5i	92	88
10	2,4-Cl ₂ -C ₆ H ₃	4	5j	90	89

^a Conditions: **3** (0.48 mmol), **4a-j** (0.40 mmol) and **2** (10 mol%) in toluene (4.0 mL). ^b Results were determined using HPLC. Configuration and retention time were determined by comparison with the literature data. ^c All products obtained in *R* configuration.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In conclusion, a novel chiral catalyst based on diazadioxocalix[2]arene[2]triazine for the asymmetric Michael addition of anthrone to various nitrostyrenes has been synthesized. The reaction provided the Michael adducts with high yield values (95%) and high enantioselectivity values (98%). According to the data obtained from the study, the chiral catalyst is a highly effective catalyst for the Michael reaction under catalytic asymmetric reaction conditions. Further investigation of this catalyst in other asymmetric reactions is currently on going in our laboratory.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship Contribution Statement

Ü.Ö.: Methodology, Data Curation, Formal Analysis, **H.N.G.:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - Original Draft, **A.S.:** Supervision, Resources, Writing - Review & Editing

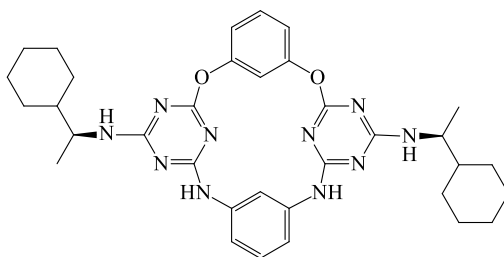
REFERENCES

- [1] M.W. Ha, S.M. Paek, Recent advances in the synthesis of ibuprofen and naproxen, *Molecules*. 26 (2021), 4792-4814. doi:10.3390/molecules26164792
- [2] L. Albrecht, H. Jiang, K.A. Jørgensen, Hydrogen-bonding in aminocatalysis: From proline and beyond, *Chemistry–A European Journal*. 20 (2014), 358-368. doi:10.1002/chem.201303982
- [3] B.T. Kumpuga, S. Itsuno, Synthesis of chiral polyesters of cinchona alkaloid catalysts for enantioselective Michael addition of anthrone to nitroalkenes, *Journal of Catalysis*. 361 (2018), 398–406. doi:10.1016/j.jcat.2018.03.020
- [4] B. Kasprzyk-Hordern, Pharmacologically active compounds in the environment and their chirality, *Chemical Society Reviews*. 39 (2010), 4466-4503. doi:10.1039/C000408C
- [5] M. Tsakos, C.G. Kokotos, Primary and secondary amine-(thio)ureas and squaramides and their applications in asymmetric organocatalysis, *Tetrahedron*. 69 (2013), 10199-10222. doi:10.1016/j.tet.2013.09.080
- [6] Y. Wang, X. Xu, G. Wu, B. Pang, S. Liao, Y. Ji, Ligand-enabled C–H olefination and lactonization of benzoic acids and phenylacetic acids via palladium catalyst, *Organic Letters*. 24(3) (2022), 821-825. doi:10.1021/acs.orglett.1c04000
- [7] Q. Zhang, B.F. Shi, 2-(Pyridin-2-yl)isopropyl (PIP) amine: An enabling directing group for divergent and asymmetric functionalization of unactivated methylene C(sp³)–H bonds, *Accounts of Chemical Research*. 54(12) (2021), 2750-2763. doi:10.1021/acs.accounts.1c00168
- [8] R. Chang, Y. Chen, W. Yang, Z. Zhang, Z. Guo, Y. Li, Unveiling the mechanism, origin of stereoselectivity, and ligand-dependent reactivity in the Pd(II)-catalyzed unbiased methylene C(sp³)–H Alkenylation–Aza-Wacker Cyclization reaction, *The Journal of Organic Chemistry*. 85(20) (2020), 13191-13203. doi:10.1021/acs.joc.0c01906
- [9] M. Borgini, P. Wipf, Stereoselective synthesis of δ -fluorinated isoleucines exploiting consecutive C(sp³)-H bond activations, *Tetrahedron*. 120 (2022), 132876. doi:10.1016/j.tet.2022.132876
- [10] S. Garai, K.G. Ghosh, A. Biswas, S. Chowdhury, D. Sureshkumar, Diastereoselective palladium-catalyzed C(sp³)–H cyanomethylation of amino acid and carboxylic acid derivatives, *Chemical Communications*. 58(56) (2022), 7793-7796. doi:10.1039/D2CC03106J
- [11] J. Sheng, D.R.S. Pooler, B.L. Feringa, Enlightening dynamic functions in molecular systems by intrinsically chiral light-driven molecular motors, *Chemical Society Reviews*. 29 (2023), 52(17), 5875-5891. doi: 10.1039/d3cs00247k.
- [12] G.T.M. Bitchagno, V.A. Nchiozem-Ngnitedem, D. Melchert, S.A. Fobofou, Demystifying racemic natural products in the homochiral world, *Nature Reviews Chemistry*. 6(11) (2022), 806-822. doi: 10.1038/s41570-022-00431-4.
- [13] R. Tamatam, D. Shin, Asymmetric synthesis of US-FDA approved drugs over five years (2016-2020): A recapitulation of chirality, *Pharmaceuticals (Basel)*. 16(3) (2023), 339. doi: 10.3390/ph16030339.
- [14] S. Orlandini, G. Hancu, Z.I. Szabó, A. Modroiu, L.A. Papp, R. Gotti, S. Furlanetto, New

- trends in the quality control of enantiomeric drugs: Quality by design-compliant development of chiral capillary electrophoresis methods, *Molecules*. 27(20) (2022), 7058. doi:10.3390/molecules27207058.
- [15] D. Ghislieri, N.J. Turner, Biocatalytic approaches to the synthesis of enantiomerically pure chiral amines. *opics in Catalysis*. 57 (2014), 284–300. doi:10.1007/s11244-013-0184-1
- [16] D. Koszelewski, I. Lavandera, D. Clay, D. Rozzell, W. Kroutil, Asymmetric synthesis of optically pure pharmacologically relevant amines employing ω -transaminases, *Advanced Synthesis & Catalysis*. 350 (2008), 2761–2766. doi:10.1002/adsc.200800496
- [17] C.J. Dunsmore, R. Carr, T. Fleming, N.J. Turner, A chemo-enzymatic route to enantiomerically pure cyclic tertiary amines, *Journal of the American Chemical Society*. 128 (2006), 2224–2225. doi:10.1021/ja058536d
- [18] H.N. Genc, U. Ozgun, A. Sirit, Chiral tetraoxacalix[2]arene[2]triazine-based organocatalysts for enantioselective Aldol reactions, *Tetrahedron Letters*. 60 (2019), 1763–1768. doi:10.1016/j.tetlet.2019.05.051
- [19] H.N. Genc, U. Ozgun, A. Sirit, Design, synthesis and application of chiral tetraoxacalix[2]arene[2]triazine-based organocatalysts in asymmetric Michael addition reactions, *Chirality*. 31 (2019), 293–300. doi:10.1002/chir.23055
- [20] H.N. Genc, Enantioselective Michael reaction of anthrone catalyzed by chiral tetraoxacalix[2]arene[2]triazine derivatives, *RSC Advances*. 9 (2019), 21063–21069. doi:10.1039/C9RA03029H
- [21] H.N. Genc, Effective asymmetric Michael addition of anthrone to nitroalkenes using chiral tetraoxacalix[2]arene[2]triazines as organocatalysts, *Chirality*. 31 (2019), 711–718. doi:10.1002/chir.23108
- [22] M.X. Wang, H.B. Yang, A general and high yielding fragment coupling synthesis of heteroatom-bridged calixarenes and the unprecedented examples of calixarene cavity fine-tuned by bridging heteroatoms, *Journal of the American Chemical Society*. 126(47) (2004), 15412–15422. doi:10.1021/ja0465092
- [23] H.B. Yang, D.X. Wang, Q.Q. Wang, M.X. Wang, Efficient functionalizations of heteroatom-bridged calix[2]arene[2]triazines on the larger rim, *The Journal of Organic Chemistry*. 72(10) (2007), 3757–3763. doi:10.1021/jo070001a
- [24] M. Shi, Z.Y. Lei, M.X. Zhao, J.W. Shi, A highly efficient asymmetric Michael addition of anthrone to nitroalkenes with cinchona organocatalysts, *Tetrahedron Letters*. 48 (2007), 5743–5746. doi:10.1016/j.tetlet.2007.06.107
- [25] Y.H. Liao, H. Zhang, Z.J. Wub, L.F. Cun, X.M. Zhang, W.C. Yuan, Enantioselective Michael addition of anthrone to nitroalkenes catalyzed by bifunctional thiourea-tertiary amines, *Tetrahedron Asymmetry*. 20(20) (2009), 2397–2402. doi:10.1016/j.tetasy.2009.09.023

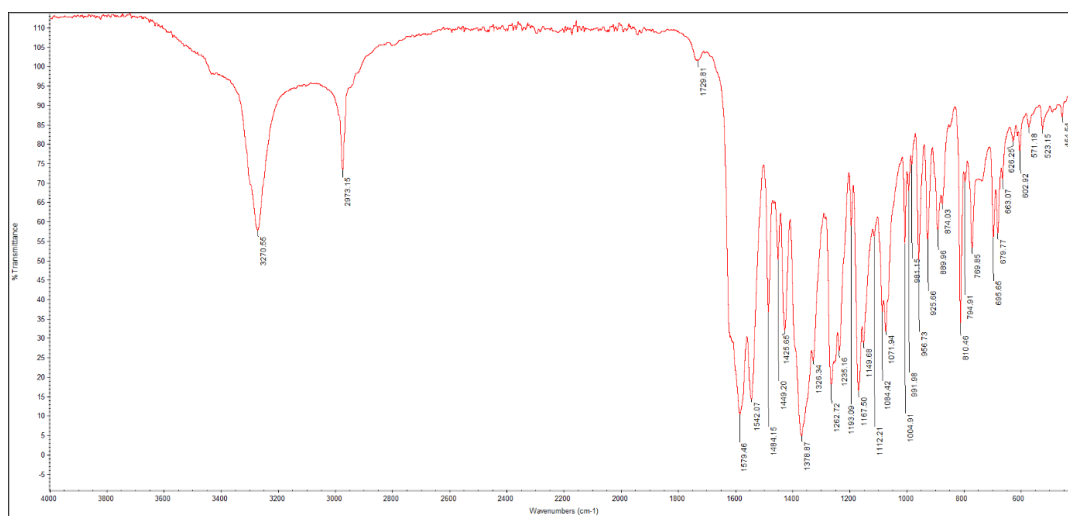
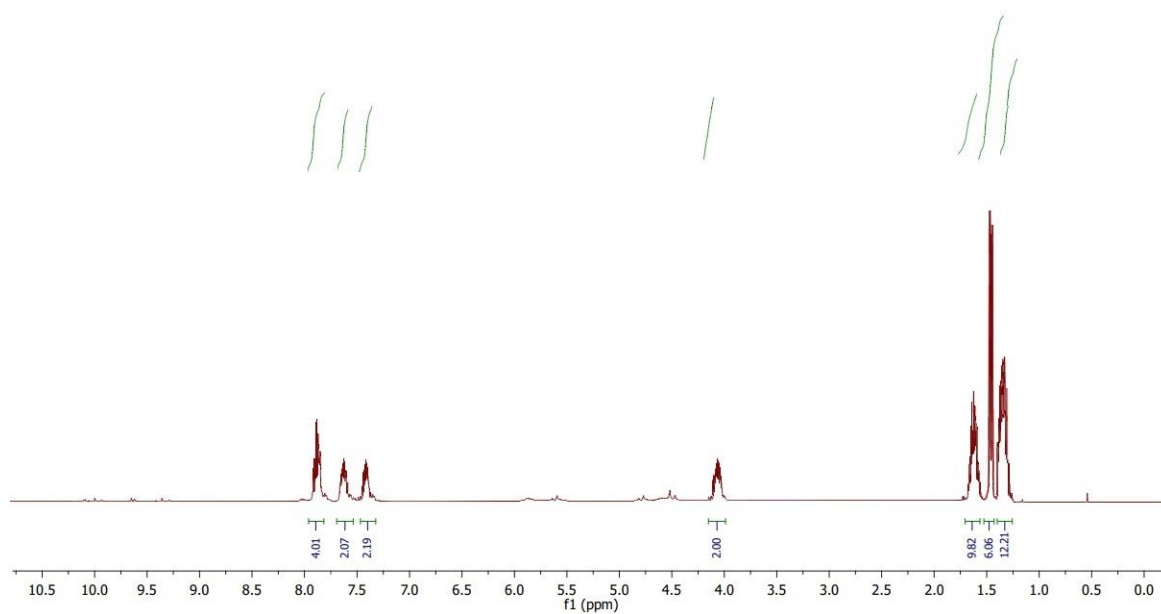
Supporting Information

Chiral Catalyst 2

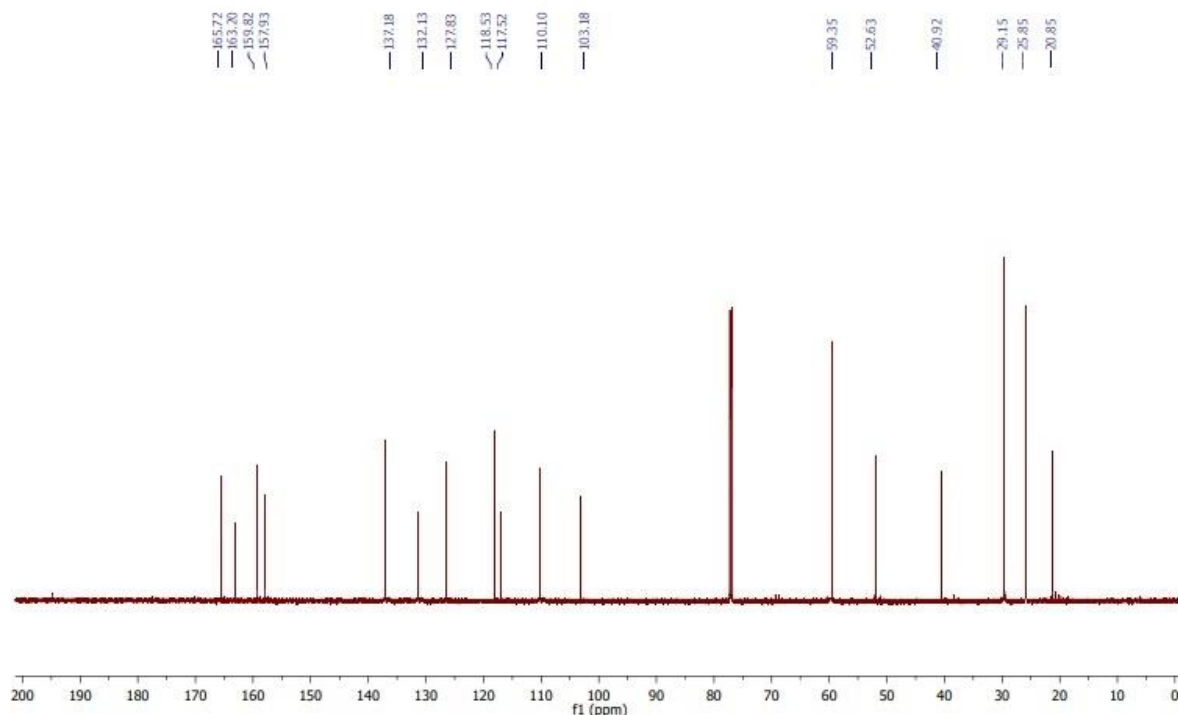


2

FT-IR spectra of catalyst 2

¹H NMR spectra of catalyst 2

¹³C NMR spectra of catalyst 2



5a: (R)-10-(2-nitro-1-phenylethyl)anthracen-9(10H)-one [24]

FTIR (cm⁻¹): 1673, 1602, 1543, 1312, 928; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ 8.03 (d, *J* = 7.8 Hz, 1H), 7.94 (d, *J* = 7.6 Hz, 1H), 7.65-7.54 (m, 2H), 7.51-7.42 (m, 4H), 7.12 (t, *J* = 7.8 Hz, 1H), 6.91 (t, *J* = 7.6 Hz, 2H), 6.00 (d, *J* = 7.8 Hz, 2H), 4.86 (dd, *J* = 13.0, 9.1 Hz, 1H), 4.58 (dd, *J* = 13.3, 7.3 Hz, 1H), 4.51 (d, *J* = 3.8 Hz, 1H), 4.08-4.01 (m, 1H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ 183.5, 143.3, 138.7, 134.2, 133.6, 132.9, 132.7, 131.8, 128.8, 128.4, 128.3, 128.2, 128.0, 127.7, 126.7, 126.2, 75.4, 52.7, 46.9.

5b: (R)-10-(2-nitro-1-(2-nitrophenyl)ethyl)anthracen-9(10H)-one [25]

FTIR (cm⁻¹): 1668, 1602, 1551, 1528, 1311, 934; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ 7.88 (dd, *J* = 13.8, 7.7 Hz, 2H), 7.60-7.46 (m, 6H), 7.37-7.27 (m, 3H), 6.71-6.68 (m, 1H), 5.29 (dd, *J* = 13.8, 5.4 Hz, 1H), 5.12 (dd, *J* = 13.4, 10.3 Hz, 1H), 4.85 (d, *J* = 5.3 Hz, 1H), 4.77-4.71 (m, 1H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ 182.1, 150.1, 140.8, 139.9, 134.2, 132.8, 132.3, 132.1, 131.8, 129.6, 129.3, 129.0, 128.8, 128.2, 127.7, 127.5, 126.3, 125.7, 124.9, 77.8, 46.5, 44.8.

5c: (R)-10-(1-(2-methoxyphenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [25]

FTIR (cm⁻¹): 1660, 1602, 1558, 1507, 1322, 927; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ 7.89 (m, *J* = 7.8 Hz, 1H), 7.82 (d, *J* = 7.6 Hz, 1H), 7.62-7.58 (t, *J* = 7.4 Hz, 2H), 7.50-7.40 (m, 4H), 7.13 (t, *J* = 7.5 Hz, 1H), 6.72 (d, *J* = 8.2 Hz, 1H), 6.53 (t, *J* = 7.4 Hz, 1H), 6.02 (d, *J* = 6.8 Hz, 1H), 4.43 (d, *J* = 5.7 Hz, 1H), 3.82 (s, 3H), 3.60 (m, 1H), 3.01 (d, *J* = 6.8 Hz, 2H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ 182.9, 156.8, 143.6, 141.3, 132.2, 131.8, 129.6, 129.3, 128.4, 128.1, 127.8, 126.6, 125.6, 124.5, 121.4, 120.6, 108.3, 75.3, 55.8, 46.2, 44.8.

5d: (R)-10-(1-(2-bromophenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [25]

FTIR (cm⁻¹): 1657, 1597, 1554, 1321, 936; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ 7.86 (d, *J* = 7.8 Hz, 1H); 7.65-7.52 (m, 5H), 7.37-7.30 (m, 2H), 7.14-7.11 (m, 2H), 6.62-6.59 (m, 1H), 5.14 (dd, *J* = 13.8,

5.5 Hz, 1H), 5.02-4.90 (m, 1H), 4.83 (d, $J = 5.6$ Hz, 1H), 4.00-3.96 (d, $J = 6.8$ Hz, 2H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 181.4, 141.3, 139.6, 135.2, 133.3, 132.5, 132.3, 131.8, 130.1, 129.5, 129.0, 128.3, 127.6, 126.8, 126.1, 126.0, 76.9, 49.7, 45.2.

5e: (R)-10-(1-(3-bromophenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [25]

FTIR (cm^{-1}): 1662, 1659, 1549, 1315, 935; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 8.17 (d, $J = 7.8$ Hz, 1H), 8.03 (d, $J = 7.7$ Hz, 1H), 7.70-7.64 (m, 2H), 7.59-7.42 (m, 4H), 7.29 (d, $J = 8.8$ Hz, 1H), 6.55 (m, 2H), 5.56 (m, 1H), 4.86 (d, $J = 6.6$ Hz, 1H), 4.60-4.56 (m, 1H), 3.57 (d, $J = 6.8$ Hz, 2H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 183.2, 142.6, 139.3, 135.6, 134.8, 133.7, 133.2, 132.8, 131.8, 131.5, 129.5, 128.7, 128.4, 128.3, 128.2, 127.4, 127.1, 126.8, 121.8, 76.2, 54.0, 46.8.

5f: (R)-10-(1-(4-fluorophenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [24]

FTIR (cm^{-1}): 1655, 1601, 1547, 1512, 1333, 932; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 8.05 (d, $J = 7.8$ Hz, 1H), 7.88 (d, $J = 7.4$ Hz, 1H), 7.70-7.66 (m, 2H), 7.54-7.42 (m, 4H), 6.71 (t, $J = 8.6$ Hz, 2H), 5.95 (dd, $J = 8.6, 5.4$ Hz, 2H), 4.88 (dd, $J = 13.2, 9.2$ Hz, 1H), 4.58 (dd, $J = 13.1, 7.4$ Hz, 1H), 4.45 (d, $J = 3.7$ Hz, 1H), 4.05-4.00 (m, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 182.6, 161.7, 142.3, 138.7, 134.4, 133.4, 132.6, 131.8, 131.1, 129.4, 128.8, 128.4, 128.2, 128.0, 127.8, 127.5, 127.2, 115.3, 114.6, 75.6, 53.7, 47.3.

5g: (R)-10-(1-(4-chlorophenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [24]

FTIR (cm^{-1}): 1657, 1612, 1551, 1326, 932; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 8.07 (d, $J = 7.8$ Hz, 1H), 8.02 (d, $J = 7.9$ Hz, 1H), 7.66-7.60 (m, 2H), 7.56-7.42 (m, 4H), 6.89 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 6.02 (d, $J = 8.6$ Hz, 2H), 4.66 (d, $J = 6.8$ Hz, 1H), 4.48 (d, $J = 3.4$ Hz, 1H), 4.02 (d, $J = 6.8$ Hz, 2H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 182.7, 141.6, 138.3, 134.5, 134.2, 133.2, 132.7, 132.4, 131.8, 130.2, 128.5, 128.2, 128.0, 127.8, 127.5, 127.3, 127.0, 126.7, 75.4, 52.4, 46.8.

5h: (R)-10-(1-(4-methoxyphenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [24]

FTIR (cm^{-1}): 1671, 1585, 1557, 1502, 1312, 931; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 8.08 (d, $J = 7.4$ Hz, 1H), 7.96 (d, $J = 7.8$ Hz, 1H), 7.66-7.59 (m, 2H), 7.52-7.40 (m, 4H), 6.48 (d, $J = 8.6$ Hz, 2H), 6.06 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 4.75 (dd, $J = 13.2, 8.9$ Hz, 1H), 4.55 (dd, $J = 13.3, 7.6$ Hz, 1H), 4.38 (d, $J = 3.7$ Hz, 1H), 3.99-3.96 (m, 1H), 3.68 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 182.7, 161.2, 141.6, 139.2, 134.6, 133.8, 132.7, 132.5, 129.5, 128.4, 128.3, 128.0, 127.9, 127.6, 127.1, 125.3, 114.2, 76.8, 54.8, 52.3, 46.8.

5i: (R)-10-(2-nitro-1-(p-tolyl)ethyl)anthracen-9(10H)-one [24]



FTIR (cm^{-1}): 1658, 1596, 1547, 1322, 930; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 8.08 (d, $J = 7.4$ Hz, 1H), 7.98 (d, $J = 7.8$ Hz, 1H), 7.60-7.56 (m, 2H), 7.47 (d, $J = 7.6$ Hz, 2H), 7.42-7.32 (m, 2H), 6.73 (d, $J = 7.8$ Hz, 2H), 6.01 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 4.85 (dd, $J = 13.2, 8.7$ Hz, 1H), 4.58 (td, $J = 6.8, 6.5$ Hz, 1H), 3.91 (d, $J = 6.8$ Hz, 2H), 2.19 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 182.8, 142.2, 139.5, 138.3, 134.5, 133.7, 132.5, 132.3, 129.8, 128.6, 128.5, 128.2, 127.6, 127.3, 126.5, 126.1, 75.7, 54.1, 46.8, 21.9.

5j: (R)-10-(1-(2,4-dichlorophenyl)-2-nitroethyl)anthracen-9(10H)-one [24]

FTIR (cm^{-1}): 1672, 1592, 1552, 1323, 931; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): δ 8.19 (t, $J = 7.6$ Hz, 2H), 7.61 (s, 2H), 7.60-7.42 (m, 4H), 6.98 (d, $J = 7.1$ Hz, 1H), 6.79 (d, $J = 6.8$ Hz, 1H), 6.22 (d, $J = 8.6$ Hz, 1H), 4.67-4.58 (m, 2H), 4.38-4.30 (m, 2H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): δ 183.5, 140.1, 138.8, 136.2, 134.7, 133.7, 133.3, 132.9, 132.4, 131.6, 130.4, 129.7, 128.7, 128.5, 128.2, 127.8, 127.3, 127.2, 126.4, 73.2, 47.0, 43.0.

Türkiye'de Fotovoltaik Sistemlerin Fizibilitesinin Değerlendirilmesi: On-Grid, Off-Grid ve Şebeke Ölçekli FV Kurulumlarının Teknik ve Ekonomik Analizi

Berkeli AKGAYEV¹  Serdar AKBAYRAK²  Mücahit YILMAZ² 

Mahmut Sami BÜKER³  Veysel ÜNSÜR² 

¹ Necmettin Erbakan University, Department of Energy Systems Engineering, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Basic Sciences, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Astronautics, Department of Aeronautical Engineering, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 02.08.2023

Kabul Tarihi: 13.01.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

FV sistemler,
Güneş enerjisi,
Off-Grid sistemler,
On-Grid sistemler,
Yenilenebilir enerji.

Günümüz enerji üretiminin vazgeçilmez olan fosil yakıtlar, sera gazı emisyonlarını açığa çıkararak önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Daha temiz ve sürdürülebilir bir alternatif olarak, yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş enerjisi, dünya çapında önem kazanmıştır. Özellikle fotovoltaik (FV) sistemler, herhangi bir zararlı yan ürün olmadan elektrik üretmek için güneş enerjisinden yararlanmanın etkili bir yoludur. Bu teknoloji, Türkiye gibi büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlı ve zengin güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler için büyük umut vaat etmektedir. Bu nedenle, bu çalışma Türkiye'deki FV sistemlerinin fizibilitesini değerlendirmeyi ve potansiyel engelleri keşfetmeyi amaçlamaktadır. Güvenilir ve sürdürülebilir enerji tedariki sağlamak için hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız FV sistemleri dikkate alınır. Bu çalışmada değerlendirme, Türkiye'de farklı coğrafi bölgeleri temsil eden 7 il seçilerek yapılmıştır. Fotovoltaik sistemlerin teknik ve ekonomik fizibilite analizleri için Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen Sistem Danışmanı Modeli (SAM) kullanılmıştır. SAM simülasyonu, güneş enerjisini kullanan bölgesel konut enerji taleplerini karşılamak üzere tasarlanmış şebeke dışı fotovoltaik sistemlere odaklanarak elektrik üretimi, verimlilik ve kayıplar dahil olmak üzere önemli teknik bilgiler sağlar. Bu çalışmada, İndirgenmiş Enerji Maliyeti (LCOE), İndirgenmiş Depolama Maliyeti (LCOS) ve paranın Net Bugünkü Değeri (NPV) gibi finansal parametreleri göz önünde bulundurularak şebekeden bağımsız FV sistemlerinin ekonomik uygulanabilirliği de araştırılmıştır. Bunlara ek olarak, seçilen şehirler için FV elektrik üretiminin şebeke elektrikli ile maliyet açısından rekabet edebilir hale geldiğini gösteren şebeke paritesi kavramı da araştırılmıştır. Bu çalışma, fosil yakıt bazlı elektrik üretimine çekici bir alternatif olarak fotovoltaik sistemleri teşvik eden değerli bilgiler sunmaktadır.

Assessing the Feasibility of Photovoltaic Systems in Türkiye: Technical and Economic Analysis of On-Grid, Off-Grid, and Utility-Scale PV Installations

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 02.08.2023

Accepted: 13.01.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

PV battery,
PV systems,
Renewable energy,
Solar energy,
Utility scale PV.

Fossil fuels, whereas indispensable for energy production today, pose significant environmental challenges because of their greenhouse gas emissions. As a cleaner and sustainable alternative, renewable energy sources, particularly solar energy, have gained prominence worldwide. Photovoltaic (PV) systems offer an effective means of harnessing solar energy to generate electricity without harmful by-products. This technology holds great promise, especially for countries such as Türkiye, which heavily rely on fossil fuels and possess abundant solar energy potential. Thus, this study aims to assess the feasibility of PV systems in Türkiye and explore potential obstacles. To ensure a reliable and sustainable energy supply, both on-grid and off-grid PV systems are considered. The assessment was conducted by selecting 7 provinces that represent diverse geographical regions in Türkiye. The System Advisor Model (SAM), developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), was employed for the technical and economic feasibility analyses of these PV systems. The SAM simulation provides crucial technical insights, including electricity production, efficiency, and losses, with a specific focus on off-grid PV systems designed to meet regional residential energy demands utilizing solar energy. Furthermore, this study investigates the economic viability of off-grid PV systems by considering factors such as the levelized cost of energy (LCOE), levelized cost of storage (LCOS), and the net present value (NPV) of money. In addition, the concept of grid parity, which indicates when PV electricity generation becomes cost-competitive with grid electricity, is explored for the selected cities, thereby promoting PV systems as an attractive alternative to fossil fuel-based electricity generation.

To cite this article: Akgayev, B., Akbayrak, S., Yılmaz, M., Büker, M.S. & Ünsür, V. (2024). Assessing the feasibility of photovoltaic systems in Türkiye: Technical and economic analysis of on-grid, off-grid, and utility-scale PV installations, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 69-92. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.33>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Veysel Ünsür, yunsur@erbakan.edu.tr



INTRODUCTION

Energy has been a critical requirement for humanity throughout history. The Industrial Revolution marked the use of fossil fuels such as coal, oil, and natural gas, sustaining economies and improving living standards worldwide. However, these finite resources are rapidly depleting and pose significant environmental and ecological challenges [1]. In response to the unequal distribution and unsustainability of fossil fuels, countries are increasingly turning to renewable energy sources. Advancements in technology and escalating energy demands have accelerated this transition. Consequently, nations are taking significant strides toward diversifying their energy mix and embracing alternative sources, paving the way for renewable energy adoption. Renewable energy is derived from sources that are continuously or repeatedly replenished using natural processes. These energy sources offer a sustainable and eco-friendly alternative for various applications [2–4].

Over the last decade, the energy sector has witnessed a remarkable 130% increase in renewable energy capacity. By 2021, the total installed capacity of renewable electricity will surpass 3,064 GW, with approximately 8,000 terawatt-hours (TWh) of electricity produced from renewable sources. Among these technologies, photovoltaic (PV) systems have shown the highest growth, boasting a total installed capacity exceeding 843 GW [5], [6]. The growing interest in solar energy stems from its constant availability and its environmentally friendly nature. As a clean energy source, photovoltaic systems have gained prominence and are widely preferred in the renewable energy market [7]. PV technology harnesses photon energy from the sun and directly converts it into electrical energy without generating any polluting gasses. The reduction of carbon dioxide emissions and the sustainability of PV technologies have contributed to their widespread adoption. Solar energy has now become a well-established alternative energy source.

Given the diverse energy sources available, Türkiye stands out with its high solar energy potential. Despite not being rich in fossil resources, Türkiye boasts an average annual sunshine duration of 2,741 h and a total radiation value of 1,527.46 kWh/m². This abundant solar energy potential alone can sufficiently meet a country's energy needs [8]. As of December 2022, Türkiye's total installed electricity generation capacity reached 103.8 GW, with solar PV electricity generation accounting for only 9.1% of the total installed capacity [9]. Despite this potential, Türkiye has not fully tapped into its solar energy resources. The primary challenge lies in the installation costs of power plants and the overall cost of electricity production. In PV systems, this is determined by the levelized cost of energy (LCOE), which measures the actual cost of energy produced in USD/kWh. Numerous design decisions influence the LCOE [10]. Installation costs of PV systems vary across regions because of differences in solar radiation, financing conditions, and electricity prices [11]. The key reason for PV systems' preference is their ability to produce power at an LCOE equal to or lower than the price of purchasing electricity from the grid. This study aims to thoroughly examine the necessary infrastructure, potential support, and challenges involved in generating alternative energy using PV systems in different geographical regions of Türkiye.

TECHNICAL VARIABLE OF SIMULATION

System Advisor Model

Various simulation programmes are available for designing and analysing PV systems. Among them, the System Advisor Model (SAM) developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in 2007 [12] was employed for designing rooftop on-grid, rooftop off-grid, and commercial utility-scale PV systems in this study.

In the simulated systems, the on-grid PV systems are designed to consume the generated

electricity on-site. On the other hand, the off-grid systems are equipped with batteries, which necessitates a change in methodology to either front-of-meter (FOM) or behind-meter (BTM) strategies. For utility-scale PV systems, the focus is on producing electricity at levels that are either lower or equal to the electricity price of the region, while also assessing the feasibility and profitability of potential investments.

To comprehensively understand Türkiye's PV system potential, we selected seven cities located in different geographical regions: Artvin, Bingöl, Karaman, Sanliurfa, Tekirdag, Trabzon, and Yozgat. The selection of these cities falls within a range representing Türkiye's wide geographical and climatic diversity. This diversity allows each city to have its unique energy dynamics. While the northern provinces, Artvin and Trabzon, draw attention with their heavy rainfall, Sanliurfa in the south stands out with its high sunshine hours. Different climatic conditions vary the performance of solar energy systems. In addition, the different energy demands in each city provide unique opportunities for solar energy projects. Bringing together developed cities and developing regions offers a comprehensive perspective of economic and social diversity. Within this framework, the potential of our chosen cities for solar energy systems is notable not only in terms of energy production but also for their positive impact on the local economy and community structures.

The data used in the SAM simulation programme were acquired from real measured values and reliable databases from national and international sources. The simulation methodology remained consistent across all cities, except for location-specific parameters such as irradiance data, system size, battery capacity, and financial inputs, which were tailored to each city's characteristics.

Locations and Weather

Any location that receives sunlight has the potential for solar energy generation. Solar radiation, which indicates the incident solar energy on an object, serves as a key metric in assessing the viability of an installed PV system. The selection of cities for this study considered both solar potential and electricity consumption values. Table 1 provides a list of the selected cities along with their current global horizontal irradiance (GHI), average temperature, and wind speed.

Hourly solar radiation data for the selected locations were sourced from five different databases, including the National Solar Radiation Database (NSRDB) [13], Photovoltaic Geographic Information System (PVGIS) [14], Climate One Building Organization [15], Global Solar Atlas [16], and Energy Plus [17]. Recognizing that data from different sources may introduce uncertainties in future forecasting, a four-fold series of methods, comprising single and double exponential smoothing (SES and DES, respectively), and simple and double moving averages (SMA and DMA, respectively), were used to process each hour of data. The annual average temperature and wind speed, which significantly impact the performance of solar panels, are also included in Table 1.

Considering this comprehensive dataset, the selected cities are categorized into three groups:

- High Zone Cities: These exhibit insolation values exceeding 5 kWh/m².
- Middle Zone Cities: Falling within the range of insolation values between 4 kWh/m² and 5 kWh/m².
- Lower Zone Cities: Encompassing cities with insolation values below 4 kWh/m².

Energy Demand and Electric Load

Following the selection of cities and the evaluation of solar radiation, the electrical load of

Table 1. Weather data of selected cities [13]

#	Selected Cities	GHI (kWh/m ² /day)	Temperature (°C)	Wind Speed (m/s)
1	Artvin, Türkiye	3.83 (SMA)	12.4	1.3
2	Bingol, Türkiye	4.59 (SMA)	7.7	1.4
3	Karaman, Türkiye	5.01 (SMA)	12.0	2.3
4	Sanliurfa, Türkiye	5.15 (SMA)	18.7	2.6
5	Tekirdag, Türkiye	4.35 (SMA)	14.3	2.9
6	Trabzon, Türkiye	3.17 (SMA)	17.3	2.1
7	Yozgat, Türkiye	4.55 (SMA)	11.1	2.6

households was determined. The average energy consumption of a household encompasses electricity usage for household appliances, lighting, water heating, cooking, and air conditioning. The distribution of these components is shown in Figure 1. Heating constitutes the primary energy expenditure in an average household. The second-largest energy consumers are household appliances, water heating, and lighting. In addition, air conditioning is provided during the summer. However, in this study, we assume that heating is provided by means other than electricity, such as natural gas. Consequently, the electrical load considered for the selected cities comprises household appliances, lighting, water heating, cooking, and air conditioning, all of which are categorised as electricity consumption.

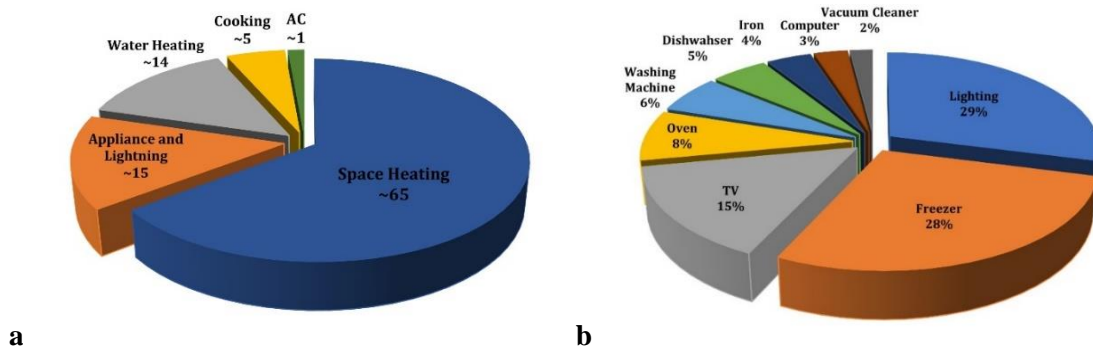


Figure 1. a) The breakdown of annual energy usage of an average household. b) Distribution of Türkiye's electricity consumption in households [18].

Table 2 presents the average electricity consumption of households in the selected cities, along with their respective maximum and minimum values. In this study, we considered the average electrical energy consumption of households in these cities. As shown, the total electricity consumption ranges from 1844 kWh to 3152 kWh, depending on the level of development in each city. The table also provides the monthly average, maximum, and minimum consumption values for a typical household. These values are crucial for sizing on-grid and off-grid PV systems. Moreover, the peak power values listed in Table 2 are vital for ensuring the sustainability of off-grid PV systems.

The peak load value given in Table 2 shows the maximum load value in kW for each month. When making this calculation, the SAM uses the monthly energy consumption values entered for each city. To calculate the critical load, we considered the electrical appliances and lighting essential for an average dwelling, including items such as refrigerators, TVs, area lighting, and cooking appliances. For our calculations, we assumed that electrical appliances are energy-efficient (rated A and above) and that each household is equipped with the same type of appliances.

Incentives

In Türkiye, various grant supports and loan options are available to encourage electricity generation from solar energy. Solar energy incentives are provided by organizations such as Small

Table 2. Total electricity consumption with monthly average minimum and maximum values [19].

Cities	Electricity (kWh/year)	Mean (kWh/month)	Min (kWh/month)	Max (kWh/month)	Peak Power (kW)
Artvin	3152	262.7	168.1	472.8	1.42
Bingol	1844	153.7	98.3	276.6	0.83
Karaman	2296	191.3	122.5	344.4	1.04
Sanliurfa	2124	177.0	113.3	318.6	0.96
Tekirdag	2692	224.3	143.6	403.8	1.22
Trabzon	3252	271.0	173.4	487.8	1.47
Yozgat	2084	173.7	111.1	312.6	0.94

and Medium Enterprises Development Organization (KOSGEB), Agriculture and Rural Development Support Institution (TKDK), Rural Development Investments Support Program (KKYDP), Technology Development Foundation of Türkiye (TTGV), and Türkiye Sustainable Energy Financing Facility (TurSEFF). Notably, the incentives offered by TKDK and KKYDP are covered by the Instrument for Pre-Accession Assistance Rural Development (IPARD) Program Fund, co-financed by the European Union and the Republic of Türkiye [20–24].

To support the construction of solar power generation facilities, VAT and custom exemptions are applied to the procurement of goods and services. In addition, corporate tax deductions ranging from 30% to 55% are offered based on the support region for rooftop PV applications. Furthermore, SGK employer premium incentives are provided for periods ranging from 6 to 12 years.

These incentive programmes categorise the provinces of Türkiye into 6 regions, and each region receives distinct treatment. For this study, we implemented solar energy incentive programmes applicable to PV systems in the provinces selected from different regions of Türkiye. Detailed information on these incentive programmes is provided in Table 3.

Table 3. Regional incentive programs in selected cities [24,25].

Regional Incentive Applications	Artvin	Bingol	Karaman	Sanliurfa	Tekirdag	Trabzon	Yozgat
Regions	4	6	3	6	1	3	5
VAT exemption	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
Customs exemption	18-20%	18-20%	18-20%	18-20%	18-20%	18-20%	18-20%
Tax exemption (Corporate tax or Income tax)	70%	90%	60%	90%	50%	60%	80%
SSI employer premium exemption	6 y	10 y	5 y	10 y	2 y	5 y	7 y
SSI employer premium exemption rate	25%	-	-	-	-	-	35%
Investment contribution rate	30%	50%	25%	50%	15%	25%	40%
Investment place allocation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Income tax withholding support	-	10 y	-	10 y	-	-	-
Property tax exemption	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Stamp duty exemption	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%

Designing and Sizing the PV System

The PV systems designed for this study comprise several key components, including solar panels, inverters, battery packs, converters, and other electrical elements such as cables. Each component plays a specific role in ensuring efficient power generation and consumption within the PV system. Solar panels directly convert sunlight into DC. The inverter, a critical electronic device, converts DC into the commonly used AC in homes. Batteries are employed to store excess energy during periods of high sunlight for backup usage when needed. In addition, converters are used to regulate the variable voltage produced by PV panels, ensuring a more consistent current flow to the battery pack and inverter.

The selected solar panels have a designed operational lifespan of 25 years, whereas the inverter and batteries are expected to operate for 10 years each. The energy system design aims for a total lifespan of 25 years, with two replacements of both inverters and batteries anticipated during this period. To size the entire PV system, the practice recommended by the IEEE, based on the electricity demand of different households in the selected cities (refer to Table 4), is followed. According to IEEE standards [26], PV system sizing considers system losses, electrical load, sunlight availability, array load (A:L) ratio, shading, wiring, contamination, transformer losses, and household load.

Sizing was conducted for three different PV systems in the selected cities: on-grid, off-grid, and utility-scale PV systems. The schematic diagrams of these systems are shown in Figure 2, and the on-grid and off-grid system capacities corresponding to the electricity consumption of the cities are provided in Table 4. On-grid systems are connected to the local electricity grid and cater to the solar energy consumption of an average family in the cities. Off-grid systems, on the other hand, are not connected to the grid and use on-site energy storage. Additional battery sizing is performed for off-grid systems to ensure sufficient power supply throughout the year, particularly during months with minimal sunshine. The commercial utility-scale PV system is standardized at 3 MW for all cities.

Table 4. Required PV capacity and corresponding design parameters

#	Cities	Residential Standalone PV	Residential PV-Battery		Commercial Utility Scale
			PV Capacity	Battery Capacity	
1	Artvin, Türkiye	5 kW	5 kW	118 kWh	3 MW
2	Bingöl, Türkiye	2.3 kW	2.3 kW	58 kWh	3 MW
3	Karaman, Türkiye	2.7 kW	2.7 kW	57 kWh	3 MW
4	Sanliurfa, Türkiye	2.3 kW	2.3 kW	53 kWh	3 MW
5	Tekirdag, Türkiye	3.6 kW	3.6 kW	84 kWh	3 MW
6	Trabzon, Türkiye	5.9 kW	5.9 kW	122 kWh	3 MW
7	Yozgat, Türkiye	2.7 kW	2.7 kW	65 kWh	3 MW

Throughout the simulation, the same module is used for every household to maintain location dependency. The residential rooftops are equipped with installed PV arrays, each consisting of half-cut 72 passivated emitter and rear contact (PERC) Si solar cells, with a maximum voltage (V_{MP}) of 41.56 V, maximum current (I_{MP}) of 10.95 A, efficiency of 20.97%, and maximum power (P_{MAX}) of 455 W_{dc}. For the inverter, the DC to AC ratio is set between 1.1 and 1.2, depending on the required installed capacity, to optimise panel use during non-peak hours. The size of the inverter varies with the selected cities to achieve the desired DC-to-AC ratio. To minimise inverting/transforming losses, the voltage for all systems, regardless of location, is set to 48 V [27–29].

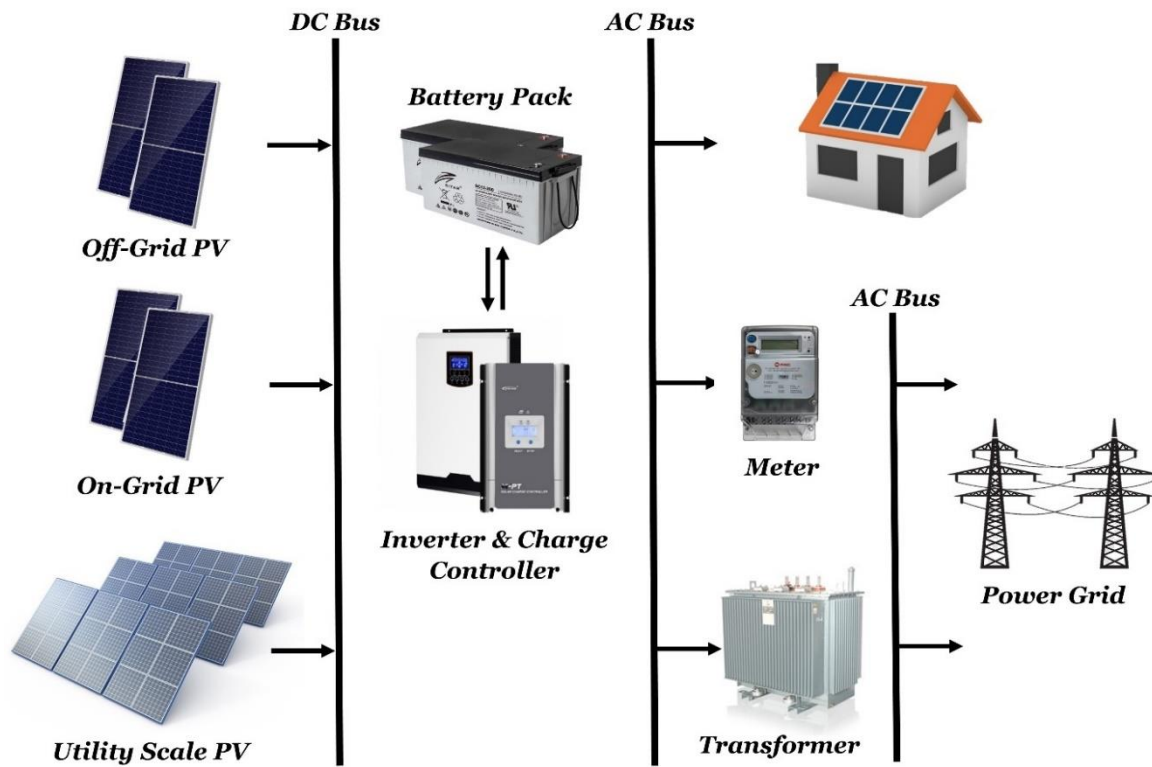


Figure 2. Schematic diagram of pv systems

Battery Sizing and Dispatch

In the design of off-grid PV systems, batteries play a crucial role in ensuring reliability and sustainability. The capacity of the battery required for each PV system depends on the duration for which it can support the household's critical load (Table 2), which varies among the selected cities. Autonomy in battery sizing is influenced by factors such as solar radiation variability, load predictability, and system availability. To calculate the appropriate battery size for the PV systems while adhering to IEEE standards, the IEEE Recommended Practice for Sizing Batteries for Standalone PV Systems [30] is applied.

Table 5. Battery Specifications of the off-grid PV System

Cities	Battery Size (A·h)	Days of Autonomy	Max Daily Load (A·h)
Artvin	2462.5	6	328.3
Bingol	1200.5	5	192.1
Karaman	1195.8	4	239.2
Sanliurfa	1106.3	4	221.3
Tekirdag	1752.6	5	280.4
Trabzon	2540.6	6	338.8
Yozgat	1356.8	5	217.1

Table 5 presents the battery specifications corresponding to the selected cities and their respective PV system sizes. The IEEE standards advocate a maximum depth of discharge (DOD) of 80% and a maximum daily DOD of 20%, with an end-of-life capacity of 80%. Following these guidelines, the batteries in the PV systems consistently operate between 20% and 80% capacity optimising the battery's lifespan and the overall number of battery cells used (in series) in the system.

Furthermore, the number of days of autonomy varies depending on the solar insolation of each location:

- Locations with solar insolation below 4.0 kWh/m²/day are provided with 6 days of autonomy.
- Locations with solar insolation between 4.0 kWh/m²/day and 4.7 kWh/m²/day are allocated 5 days of autonomy.
- Lastly, locations with solar insolation exceeding 4.7 kWh/m²/day are granted 4 days of autonomy.

As shown in Table 5, Trabzon requires the largest battery size because of its high daily load and lower insolation, while Sanliurfa and Karaman have the smallest battery sizes because of their high insolation levels and lower electric load demands.

Financial Parameters

In the financial analysis, we assess the economic viability of PV system projects in Türkiye. The costs of on-grid and off-grid PV systems are determined using reports published by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) [31], [32], whereas for utility-scale PV systems, the Renewable Power Generation Costs in 2021 report [33] published by the International Renewable Energy Agency is used. The annual loan interest was 22%, and the real discount rate was 9.75%. Other important financial parameters, such as the inflation rate, were determined by taking the average of the last 20 years (January 2023 values) [34], [35]. In addition, for commercial utility-scale PV systems, the solar power purchase agreement (PPA) rate is implemented at 0.133\$/kWh [36–38]. This data provides a detailed analysis of past performance, allowing future projects to be evaluated on a reliable basis. In addition, these data help predict future trends in the energy sector, enabling the development of sustainable and effective energy solutions.

To assess the economic viability of the study in the selected cities, we evaluated key metrics such as the levelized cost of electricity (LCOE), the levelized cost of storage (LCOS), the net present value (NPV), and the payback period of the investment [39], [40]. The LCOE represents the total cost incurred over the lifecycle of the PV system divided by the total energy produced during the same period, typically expressed in cents per kWh. This calculation considers equity investments, operating expenses, debt costs, and taxes, while also considering incentives, salvage value, and tax benefits. The LCOE is determined using the SAM software;

$$LCOE = \frac{-C_0 - \frac{\sum_{n=1}^N C_n}{(1 + r_{nominal})^n}}{\frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{(1 + r_{real})^n}} \quad \text{Eq. 1}$$

where C_n is the annual project costs in year n , C_0 is the project's equity investment amount, Q_n (kWh) electricity produced by the system in year n , N is the analysis period, r_{real} is the real discount rate and $r_{nominal}$ is the nominal discount rate.

To comprehensively analyse the impact of storage in off-grid systems, we consider the storage cost or LCOS. LCOS considers various factors, including the initial cost of the battery (installation, maintenance, and replacement), the cost of electricity needed to charge the battery, and the degradation of battery capacity over time. These considerations are crucial in assessing the overall design of off-grid PV systems. The LCOS calculations are based on the methods described in [41] and are calculated accordingly;

$$LCOS = \frac{\text{investment cost} + \sum_n^N \frac{O\&M \text{ cost}}{(1+r)^n} + \sum_n^N \frac{\text{Charging cost}}{(1+r)^n} + \sum_n^N \frac{EOL \text{ cost}}{(1+r)^{N+1}}}{\sum_n^N \frac{\text{Discharge cost}}{(1+r)^n}} \quad \text{Eq. 2}$$

where O&M is the operation and maintenance, r is the discount rate and EOL is the end-of-life cost.

The NPV is also another metric that is commonly used, which measures the cost-effectiveness of a PV system by taking both cost and revenue into account.

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad \text{Eq. 3}$$

where N is the analysis period, C_n represents the return after tax and r is the discount rate [42].

RESULTS AND DISCUSSION

The evaluation of PV systems in the selected cities was conducted through simulation using SAM. The results obtained from the simulation cover both technical and economic aspects, providing valuable insights into the feasibility of PV systems in these locations.

Technical Results: The simulation yields detailed technical data, including electricity generation, losses, and efficiency. By analysing electricity generation patterns, we can understand the system's capability to harness solar energy and produce electricity. Assessing losses allows us to identify potential areas of improvement in the PV system's design and operation. Efficiency measurements provide valuable information on the system's overall performance and effectiveness in converting sunlight into electrical energy.

Economic Viability: The economic viability of PV systems is evaluated using essential financial metrics. The payback period indicates the time required for the PV system's initial cost to be recouped through electricity generation and savings. The LCOE quantifies the average cost of producing electricity over the system's lifetime, incorporating various factors such as investment costs, operating expenses, and incentives. In addition, the LCOS is analysed for off-grid systems to understand the economic impact of battery storage, considering battery-related costs and performance over time.

The results and analysis from the simulation will be discussed in detail to provide valuable insights into the technical and economic feasibility of implementing PV systems in the selected cities. This discussion will shed light on the potential challenges, benefits, and opportunities associated with each type of PV system (on-grid, off-grid, and utility-scale) and will enable us to draw meaningful conclusions to support the development of sustainable and efficient solar energy solutions.

Technical Analysis

The solar radiation received by cities has a significant impact on electricity production, and maximizing production is achieved through panel tilt angle optimisation and monitoring systems. Different tilt angles are applied to ensure optimal sun exposure on the PV modules. The intensity of solar radiation received on the surface of a PV module at a given angle of inclination is measured by array plane (POA) radiation. Figure 3 illustrates the POA after accounting for shading and fouling losses, which determine the capacity factor (CF) of a PV system. The POA values vary between 373 kWh/month in Bingol and 1288 kWh/month in Artvin during the winter season.

Notably, it is crucial to recognise that POA values are highly dependent on the total surface area of the PV modules. This explains why regions with less sunlight exposure, such as Trabzon and Artvin, receive higher irradiation values than regions such as Sanliurfa and Karaman. Moreover, the CF is defined as the ratio of the actual electrical energy output over a given period to the theoretical maximum electrical output during that period and is listed in Table 6 for the selected cities. Sanliurfa and Karaman have the highest CF for a PV system because of their higher insolation values of 5.15 kWh/m²/day and 4.89 kWh/m²/day, respectively. Conversely, the cities with the lowest CF values are Trabzon and Artvin, as they are located in northern Türkiye and experience fewer sunny days.

Comparing the CF values of the selected cities with the latest IRENA report [33], which indicates an average CF of 17.2% for utility-scale PV systems in 2021, it is evident that all cities, except Trabzon and Artvin, surpass the utility-scale average in Table 6 for residential-scale systems.

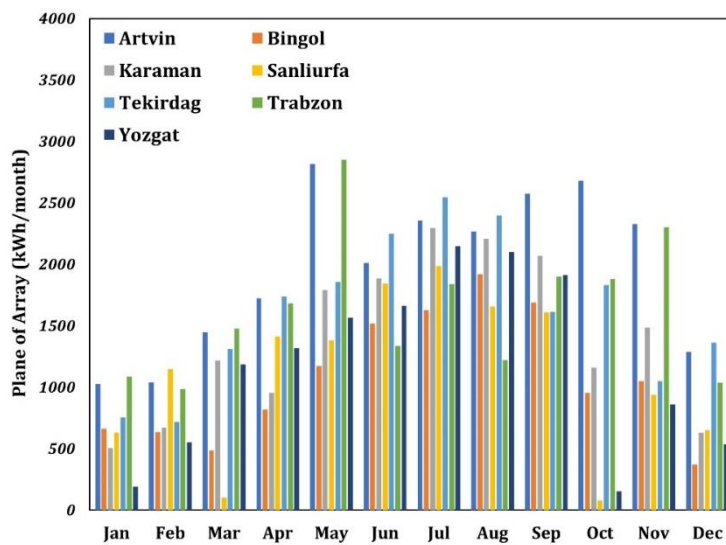


Figure 3. Plane of array (POA) incidents for the PV systems installed in selected cities.

Table 6. Technical results of PV systems for selected cities

#	Cities	Off-Grid & On-Grid		Utility Scale	
		Capacity Factor	Annual production (kWh)	Capacity Factor	Annual production (kWh)
1	Artvin	16.0%	6974	16.0%	4,204,588
2	Bingol	18.7%	3735	18.6%	4,911,718
3	Karaman	19.9%	4754	19.7%	5,186,336
4	Sanliurfa	20.6%	4099	20.4%	5,380,968
5	Tekirdag	18.3%	5825	18.1%	4,767,513
6	Trabzon	13.0%	6204	12.9%	3,410,951
7	Yozgat	18.4%	4401	18.3%	4,808,822

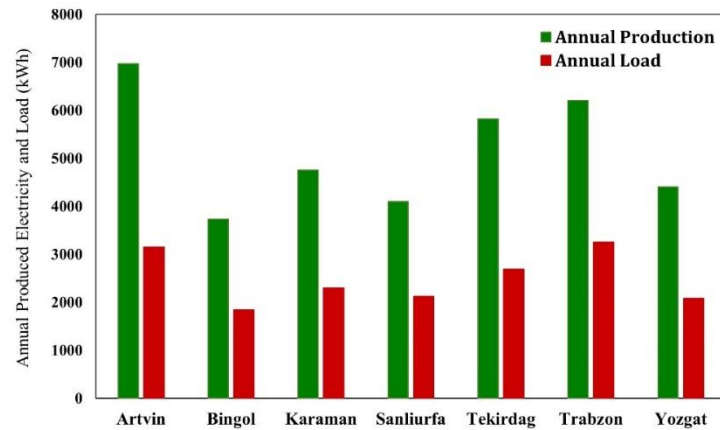


Figure 4. Annual produced energy from the PV systems and corresponding load.

In on-grid and off-grid PV systems designed to meet the actual electrical load capacity for each household in the cities (see Figure 4), the results demonstrate varying energy production levels due to different insolation rates. Figure 5 illustrates the monthly required electrical load for the selected cities along with the corresponding electrical energy generated from the PV systems. Trabzon exhibited the highest energy surplus, approximately 516 kWh/month in May, followed by Artvin with 453 kWh/month and Tekirdag with 402 kWh/month in April. Cities with lower sunlight exposure require a higher number of PV modules to meet the demand, resulting in a surplus of energy during the summer months.

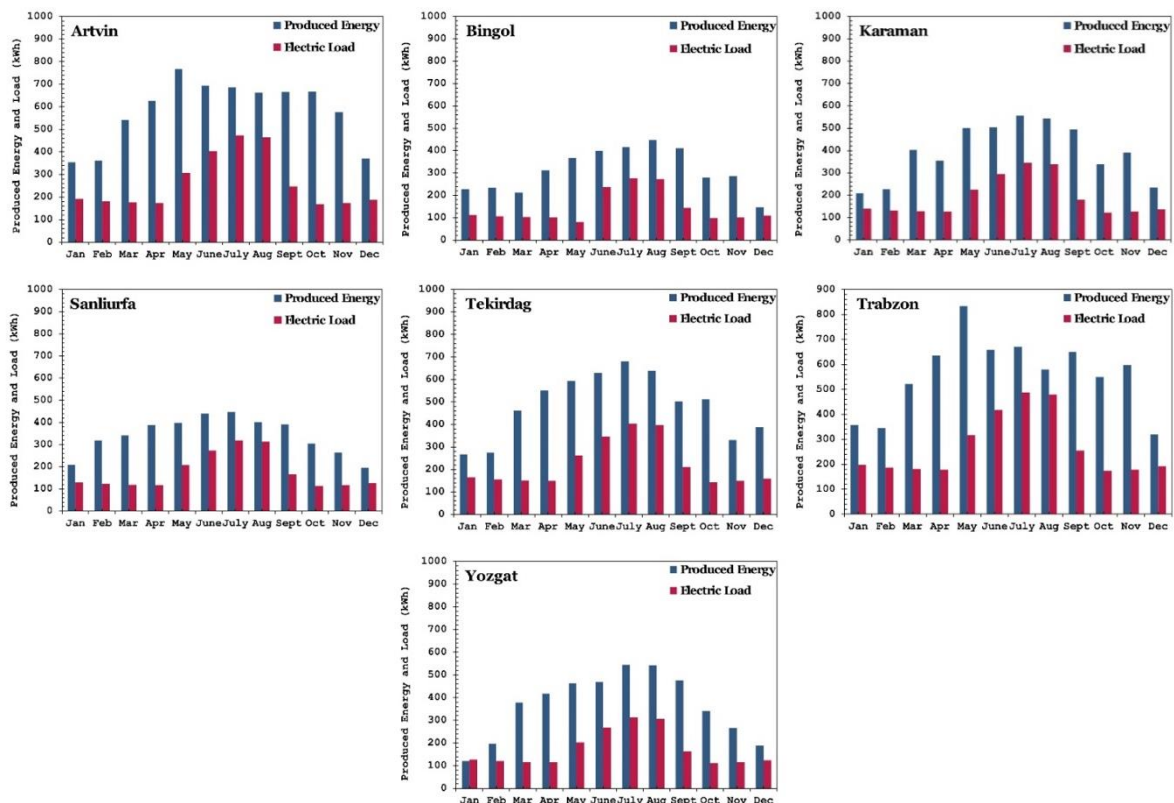


Figure 5. Monthly average produced energy and electric load in selected cities.

For off-grid PV systems in cities, Figure 6 presents a detailed energy flow analysis between the battery and load. During low-load months such as January, February, and March, the energy flow from the battery and PV system to the load is inversely proportional due to limited radiation.

Conversely, during high-load months, the flow from the PV system itself to the load is higher. The southern provinces of Türkiye, such as Sanliurfa and Karaman, demonstrate a more evenly distributed load, and the number of PV modules effectively provides the required electricity. Hence, these cities do not generate as much surplus energy during the summer months as other cities.

Figure 6 also highlights the role of batteries in off-grid PV systems, where the battery is discharged on a daily cycle. The battery can only be charged from the system, and the minimum depth of discharge is 30%. Although PV systems are sized for worst-case scenarios, batteries are essential at night and on low-light days when PV generation is insufficient for the load. The PV system prioritises meeting the required load first and then charges the battery. During periods of excess PV production, the battery is recharged and remains at full power until needed. The battery comes into play when the electrical load requires more power than the PV system can provide. As seen in the analysis, batteries play a pivotal role in maintaining the sustainability of off-grid PV systems. During sunlit months with sufficient sunlight, such as in Sanliurfa, Karaman, Bingol, and Tekirdag, the battery remains fully charged. However, cities such as Artvin and Trabzon, which have lower light intensity due to their locations, require larger batteries and rely on battery usage during the summer months.

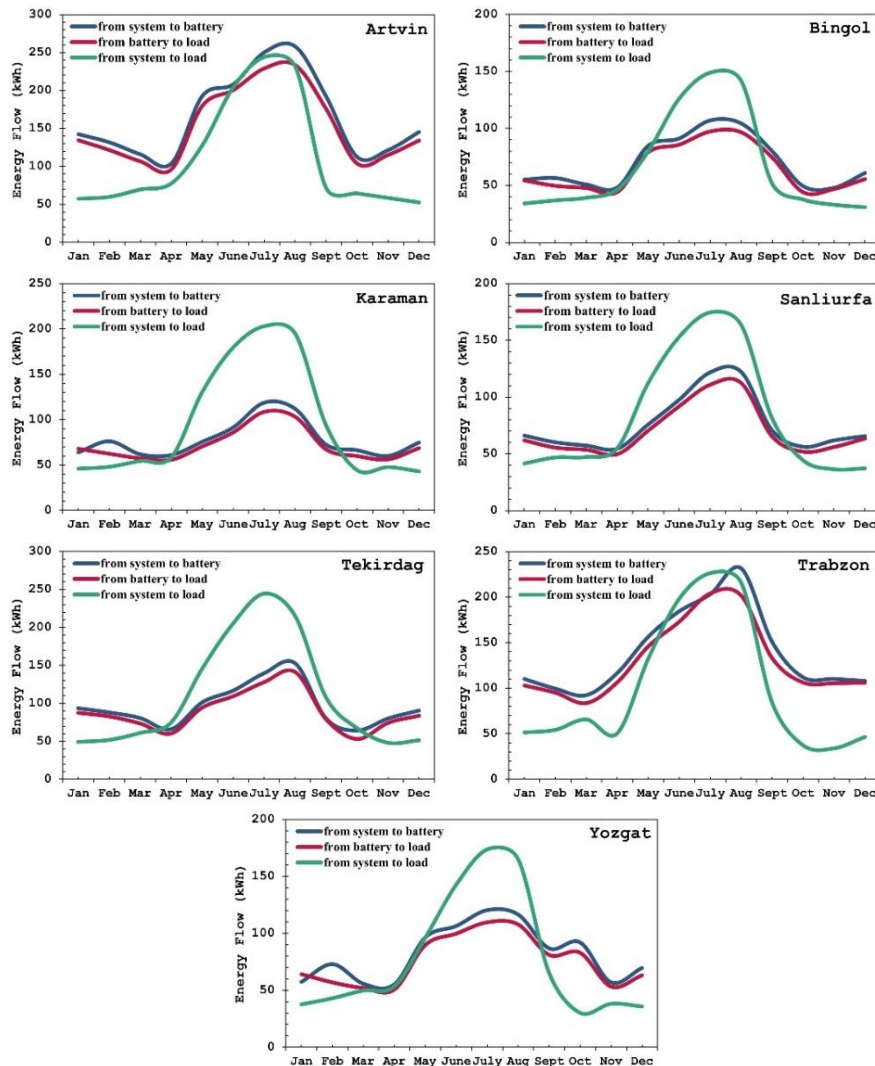


Figure 6. Energy flow in off-grid PV systems

Economic Analysis

The economic analysis of PV systems plays a crucial role in determining their feasibility and implementation. Several parameters are considered in the cost analysis, including direct capital costs such as module, inverter, controller, battery, and labour costs, as well as indirect costs such as permitting, engineering operations, and overheads. These costs were applied uniformly across all selected cities (see Table 7). However, in off-grid PV systems, the varying battery capacity requirements in different cities lead to differences in system costs. The operating and maintenance cost during the system's lifetime is \$10/kW for both on-grid and off-grid systems in residential projects, whereas it is \$18/kW for commercial utility-scale systems [33]. The simulations assume that the entire installation cost is financed through a 25-year mortgage without any upfront payment. The loan rates used in the simulation represent the average commercial loan rates offered by banks in the country over 25 years. Additionally, income tax for utility-scale PV systems is set at 12%, while on-grid and off-grid PV systems on rooftops have a zero-sales tax rate due to the absence of taxable income. The calculations also consider the incentives mentioned in Table 3, considering the regional incentive programs of the cities.

Table 7. Installation costs of PV systems in selected cities [43]

#	Cities	Total Installed Cost (\$/W _{dc})		
		On-grid PV	Off-grid PV	Utility Scale
1	Artvin	2.52	4.88	1.10
2	Bingol	2.52	5.07	1.10
3	Karaman	2.52	4.61	1.10
4	Sanliurfa	2.52	4.85	1.10
5	Tekirdag	2.52	4.83	1.10
6	Trabzon	2.52	4.75	1.10
7	Yozgat	2.52	4.90	1.10

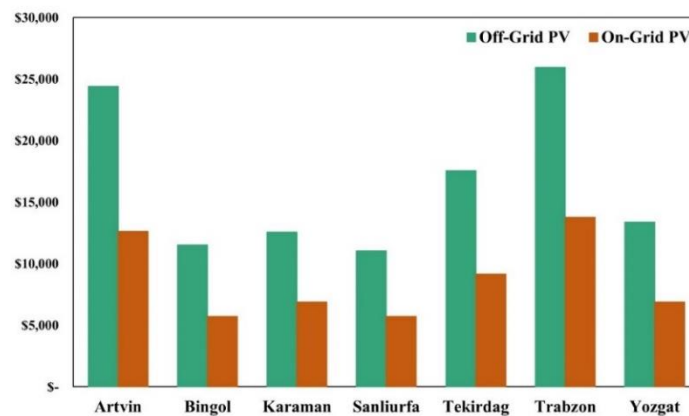


Figure 7. Comparison of installation cost of on-grid and off-grid PV systems in cities.

Table 7 presents the financial input values for the selected cities, with direct capital costs encompassing all components such as modules, inverters, balance of system equipment (BOS), battery, and labour, while indirect costs include permitting, overheads, and environmental studies. The total installed cost (\$/W_{dc}) represents the cost per nameplate DC capacity of the PV systems. However, the total installed cost (\$/W_{dc}) is not directly proportional to the total cost because of variations in electricity consumption and sunshine duration among the cities.

For on-grid PV systems, the investment cost is \$2.52/W_{dc} across all cities, whereas for utility-scale commercial PV systems, the investment cost is \$1.10/W_{dc}. In the case of off-grid PV systems, the varying battery sizes required by cities lead to investment costs ranging from \$4.61 to \$5.07/W_{dc}. Bingol and Yozgat have the highest cost per \$/W_{dc}, amounting to \$5.07/W_{dc} and

\$4.90/W_{dc}, respectively. Conversely, Karaman has the lowest \$/W_{dc} cost in off-grid PV systems, with an investment cost of \$4.61/W_{dc}.

Figure 7 provides a comparison of investment costs between rooftop on-grid and off-grid PV systems for the selected cities. Provinces with high electricity consumption require larger PV and battery capacities, resulting in higher investment costs. Trabzon and Artvin have the highest PV investment costs, with system costs of \$13,761 and \$12,614 for on-grid PV systems and \$25,963 and \$24,416 for off-grid PV systems, respectively. On the other hand, Sanliurfa and Bingol have the lowest PV investment costs, with costs of \$5,734 in on-grid PV systems and \$11,532 in off-grid PV systems.

Table 8 presents the actual LCOE, LCOS, and NPV values, which are financial output parameters obtained from the simulations. LCOE and LCOS are critical metrics for evaluating PV systems because they encompass all costs, including capital costs (direct and indirect), operating expenses, and term debt costs. The actual LCOE is particularly suited for long-term analysis, considering inflation over the project's lifespan, making it a valuable indicator for this study. Additionally, the current electricity price in Türkiye is considered to be 0.09 \$/kWh [44] (assuming a single tariff throughout the day) for comparing the energy production costs of PV systems. When comparing actual LCOE values with the current electricity prices (see Table 8), all cities except Trabzon demonstrate grid parity, implying that electricity produced by PV systems is cheaper than the current electricity prices. The inclusion of battery costs in the total cost of off-grid PV systems and subsequent LCOE calculations warrants the inclusion of LCOS in Table 8 to understand the impact of the battery system.

While the LCOE is a beneficial metric for financial feasibility assessment, it is best considered in conjunction with other indicators. The most crucial of these is NPV, as shown in Table 8 for all PV systems. NPV is significantly influenced by factors such as inflation rate, annual loan rate, and discount rate. In off-grid and utility-scale PV systems, the NPV value is negative for all cities. On the other hand, positive NPV values were observed in all cities except Trabzon for on-grid PV systems. Notably, Karaman and Sanliurfa exhibited the highest positive NPV values in on-grid PV systems. In general, all selected cities can transition to PV systems if they are considered in terms of reasonable NPV and viewed not merely as an investment, but rather as cities seeking energy independence and self-generation capabilities.

Table 8. Financial output parameters to evaluate the feasibility of PV systems.

Cities	Off-Grid PV			On-Grid PV		Utility Scale PV	
	LCOE real (\$/kWh)	LCOS real (\$/kWh)	Net Present Value (\$)	LCOE real (\$/kWh)	Net Present Value (\$)	LCOE real (\$/kWh)	Net Present Value (\$)
Artvin	0.159	0.702	-7,893	0.092	451	0.049	-454,401
Bingol	0.140	0.788	-4,056	0.079	713	0.042	-283,301
Karaman	0.120	0.702	-4,242	0.075	1,081	0.040	-216,880
Sanliurfa	0.122	0.668	-3,632	0.072	1,031	0.039	-170,459
Tekirdag	0.137	0.828	-6,278	0.081	972	0.043	-318,424
Trabzon	0.191	0.850	-9,786	0.115	-747	0.060	-645,792
Yozgat	0.138	0.757	-4,747	0.081	769	0.043	-307,801

Sensitivity Analysis of the LCOE and the NPV

The LCOE and NPV values obtained from the SAM simulations for the selected cities can be further examined through a sensitivity analysis. In this analysis, input parameters such as the discount rate (DR), the loan rate (LR), the conversion efficiency of the PV modules (η), and solar irradiation (SI) are varied to understand their impact on the selected output parameters. By

analysing the sensitivity of DR, LR, and SI to LCOE and NPV, we gain insights into how changes in these parameters affect the performance of the PV systems. Probability distributions are applied to DR, LR, and SI, and their variations are evaluated for all PV systems in the selected cities. The black line in the middle of the figures represents the simulated real LCOE values of the PV systems with the actual inputs for the selected city, while the coloured bars depict the sensitivity of the PV systems to these input parameters.

On-Grid PV

The discount rate (DR) and loan rate (LR) are financial input parameters that are altered within the probability distribution range from zero to the maximum point. The LCOE is directly proportional to DR and LR, meaning that higher DR and LR values result in higher LCOE values. On the other hand, the conversion efficiency of the PV modules (η) and solar irradiation (SI) are in an indirect correlation with the LCOE. As these parameters increase, the LCOE decreases.

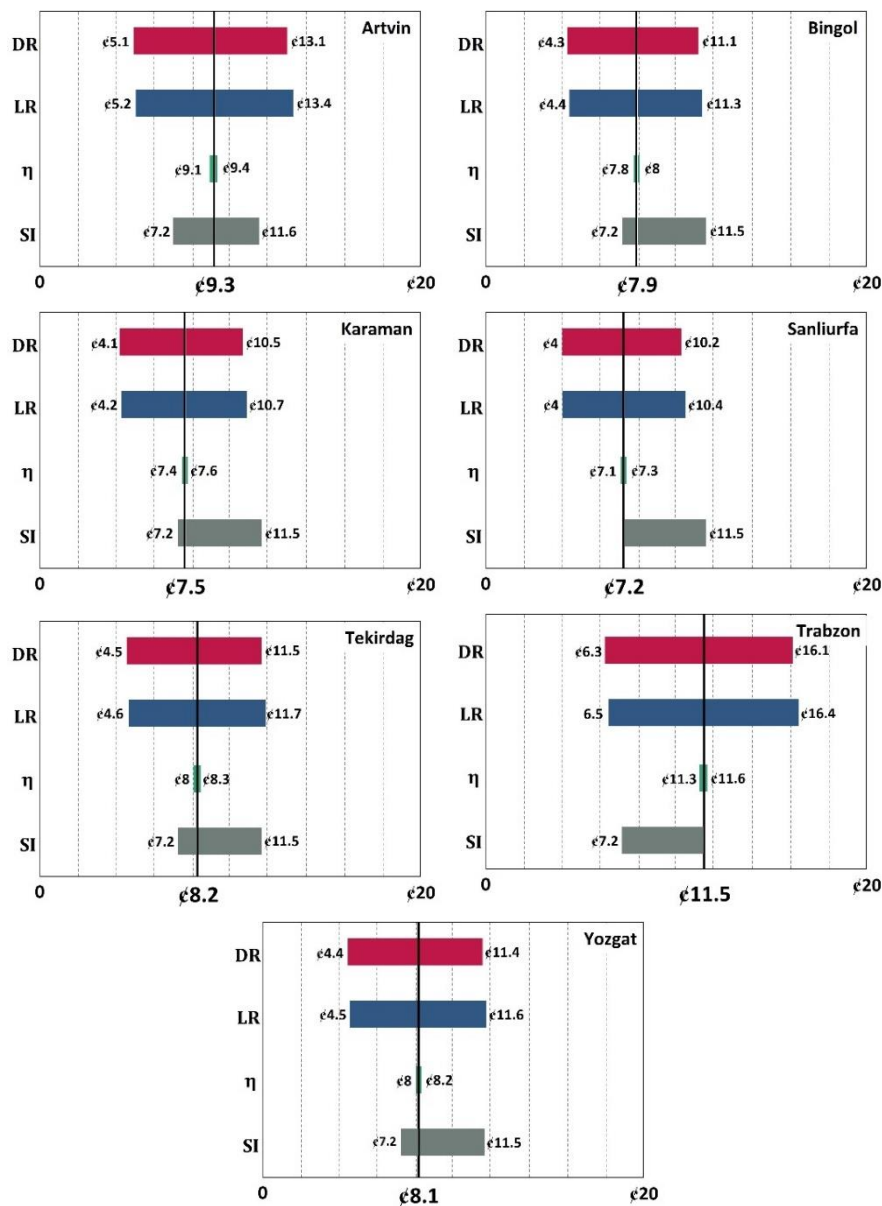


Figure 8. Sensitivity analysis of discount rate (DR), loan rate (LR), module efficiency (η) and solar radiation (SI) on LCOE values of on-grid PV systems

In addition to analysing the sensitivity of LCOE, a similar analysis is performed for NPV. By understanding the sensitivity of these key parameters, policymakers and stakeholders can make informed decisions and optimise the design and implementation of PV systems to achieve greater economic viability and energy independence in the selected cities.

Figure 8 illustrates the sensitivity analysis of the LCOE for on-grid PV systems. The loan rate and solar radiation are the parameters that have the most significant impact on the LCOE, followed by the discount rate. Cities with higher solar radiation levels, such as Sanliurfa and Karaman, are less affected by changes in solar irradiation than cities with lower sunlight exposure, such as Trabzon and Artvin. On the other hand, all cities, except Trabzon, have an LCOE equal to or lower than the grid electricity price. This indicates that an on-grid PV system can generate electricity in almost every region of Türkiye at a cost that is competitive or lower than the grid electricity price.

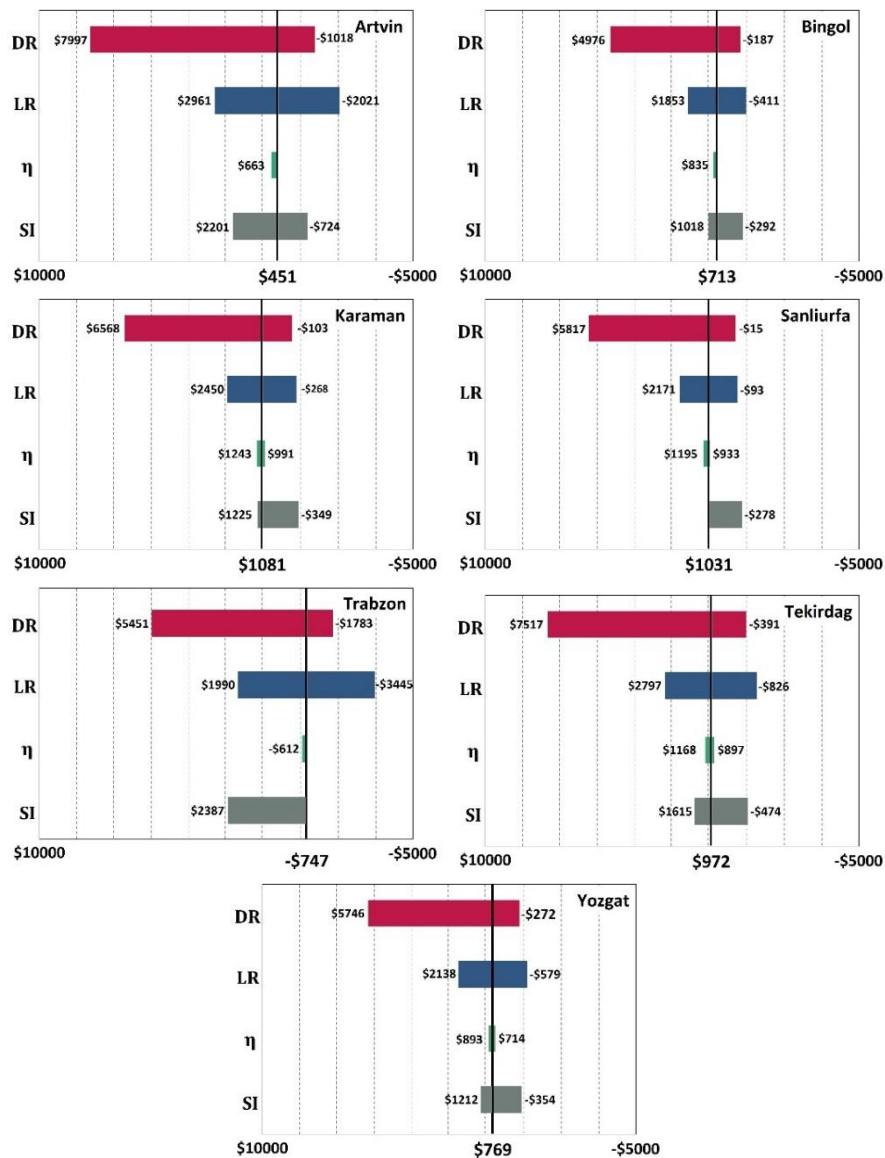


Figure 9. Sensitivity analysis of discount rate (DR), loan rate (LR), module efficiency (η) and solar radiation (SI) on NPV values of on-grid PV systems

Regarding the NPV of on-grid PV systems (Figure 9), financial constraints, represented by loan rates, have the most significant impact on the NPV. Additionally, the module efficiency as a performance input plays a substantial role in determining the feasibility of the PV project. The

positive NPV values in almost all cities indicate that at the end of the project, these on-grid PV systems can result in profitable returns. These results highlight the importance of suitable mortgage rates for PV projects offered by stakeholders such as governments and banks, as they can significantly influence the feasibility and adoption of PV in the selected cities.

By considering the sensitivity of these parameters, policymakers and investors can identify strategies to optimize the financial viability and performance of on-grid PV systems, enabling wider adoption of renewable energy sources in Türkiye.

Off-Grid PV

Similar to on-grid PV systems, off-grid PV systems are also affected by various parameters. Figure 10 demonstrates that the discount rate has the most significant impact on the LCOE, followed by the loan rate and insolation.

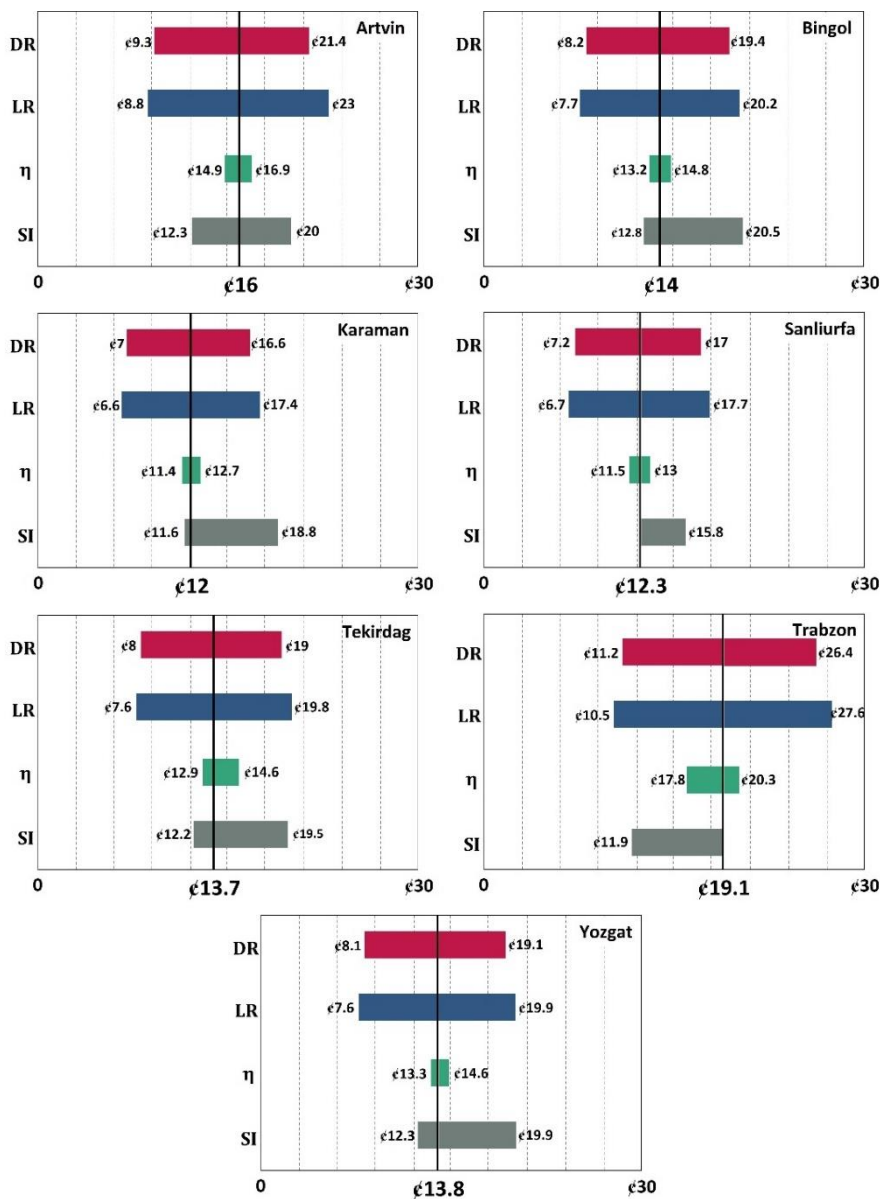


Figure 10. Sensitivity analysis of discount rate (DR), loan rate (LR), module efficiency (η) and solar radiation (SI) on LCOE values of off-grid PV systems

Cities with higher solar exposure, such as Karaman and Sanliurfa, prioritise the discount and loan rates, whereas other cities have a different pattern. Any improvement in the loan interest rate and discount rate leads to substantial reductions in the LCOE of the system. To promote the adoption and applicability of off-grid PV systems, implementing support programmes and incentive policies is crucial.

Considering the NPV values for off-grid PV systems (Figure 11), a different aspect emerges. The higher system cost of off-grid systems compared to on-grid systems makes the NPV value more significant in terms of investor preference. The duration of sunshine has little effect on NPV across all cities. Conversely, the loan interest rate plays a substantial role in determining the NPV. Additionally, advancements in battery technology and cost reductions can facilitate the integration of PV-battery systems, further increasing the attractiveness of off-grid PV systems.

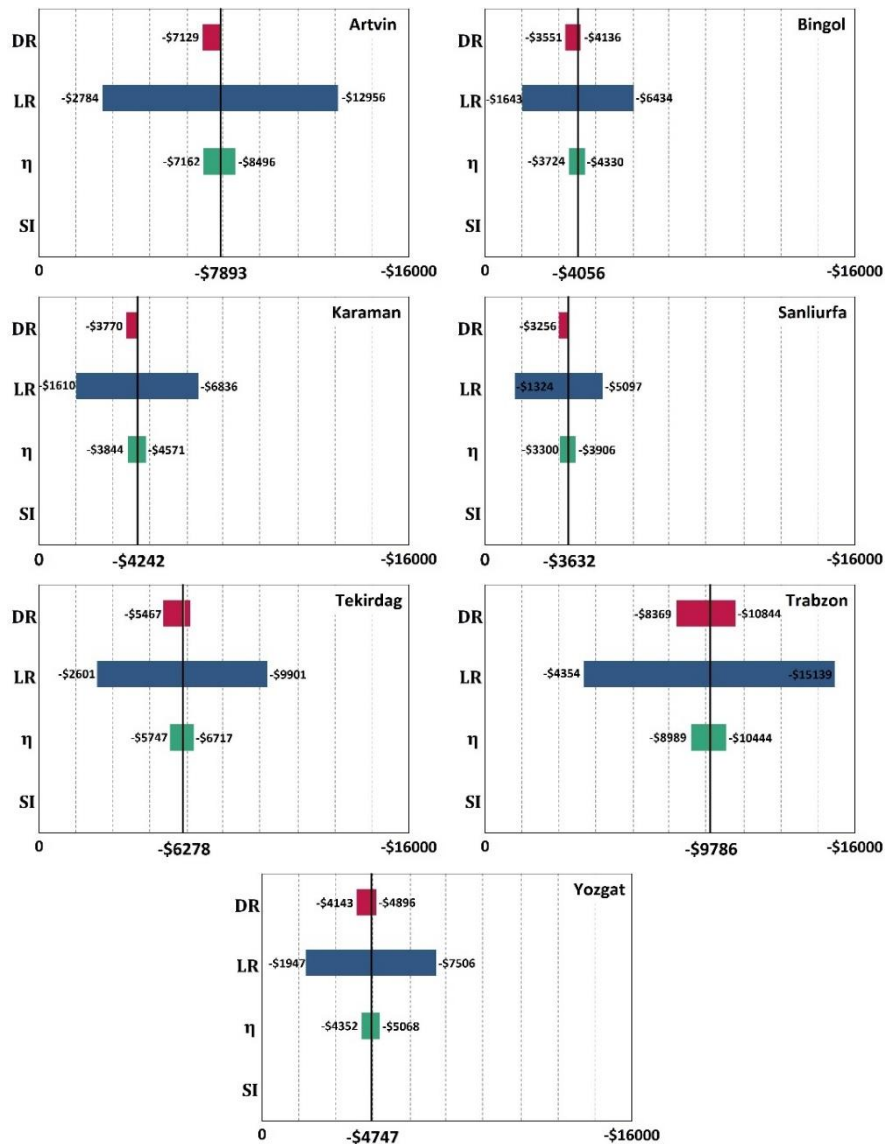


Figure 11. Sensitivity analysis of discount rate (DR), loan rate (LR), module efficiency (η) and solar radiation (SI) on NPV values of off-grid PV systems

To encourage the widespread implementation of off-grid PV systems, policymakers and investors should focus on providing favourable loan interest rates and creating a supportive environment for battery technology advancements. These measures would enhance the feasibility

and appeal of off-grid PV systems, making them a promising alternative for electricity generation in the selected cities.

Utility Scale PV

Now, let us focus on the sensitivity analysis of LCOE and NPV values for large-scale commercial PV systems in the selected cities. Figure 12 illustrates the sensitivity analysis of LCOE values, while Figure 13 presents the sensitivity analysis of NPV values.

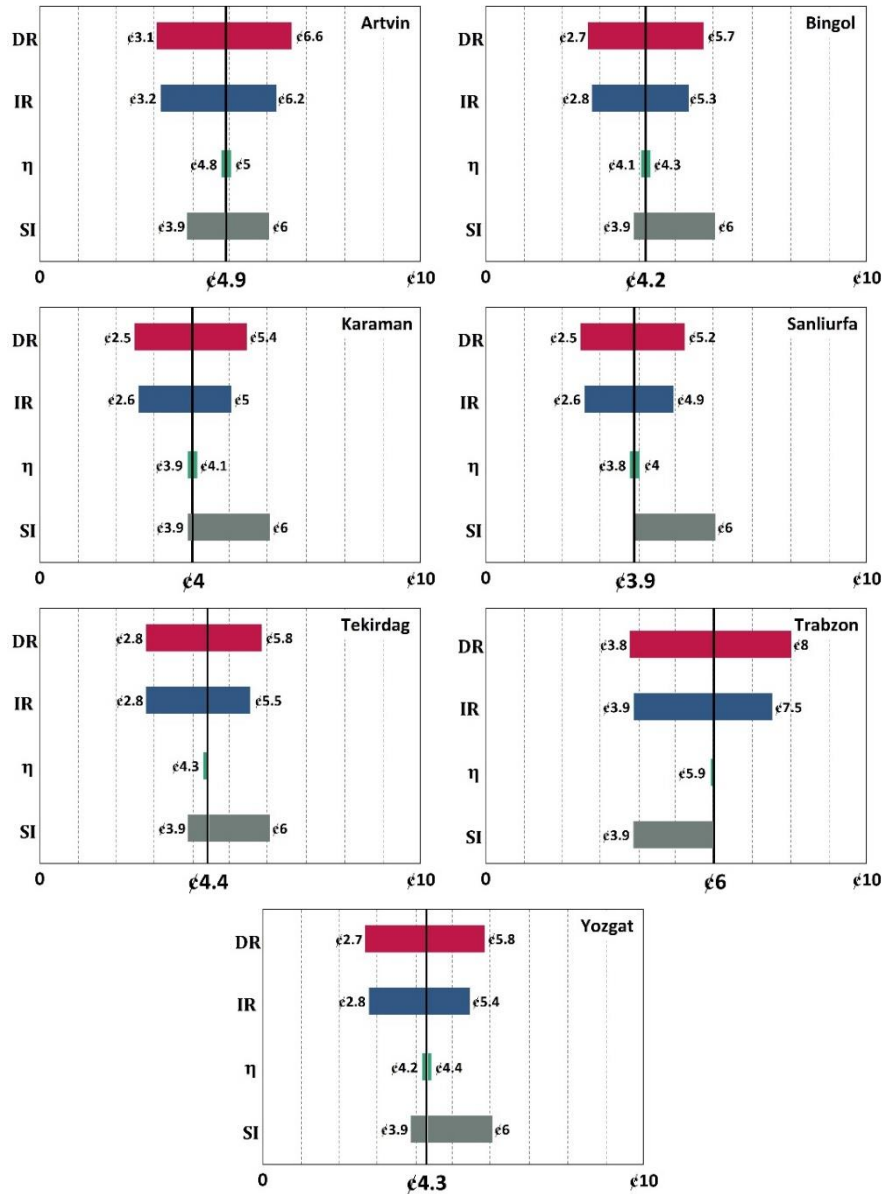


Figure 12. Sensitivity analysis of discount rate (DR), interest rate (IR), module efficiency (η) and solar radiation (SI) on LCOE values of utility-scale PV systems.

In utility-scale PV systems, the LCOE value of 4€/kWh across all regions of Türkiye establishes a competitive foundation for electricity generation. As in other PV systems, this value can be further reduced by improving the discount and loan rates. Notably, cities such as Karaman, Sanliurfa, and Bingol are in a more advantageous position for electricity generation using PV systems than other cities (see Figure 12). Interestingly, the power η showed the lowest correlation with LCOE for all cities. This suggests that while the variation in η should not be overlooked, it

would be more beneficial to focus on other uncertainties. This finding may also highlight the potential impact of new and emerging solar cell technologies on LCOE.

In terms of NPV values, all cities showed negative values (see Figure 13). As mentioned earlier in the sensitivity analysis of other PV systems, a positive NPV value can be achieved in all cities by primarily considering the interest and discount rates. In this context, steps taken by banks and governments to support PV systems will play a crucial role in accelerating the transition to large-scale commercial PV systems.

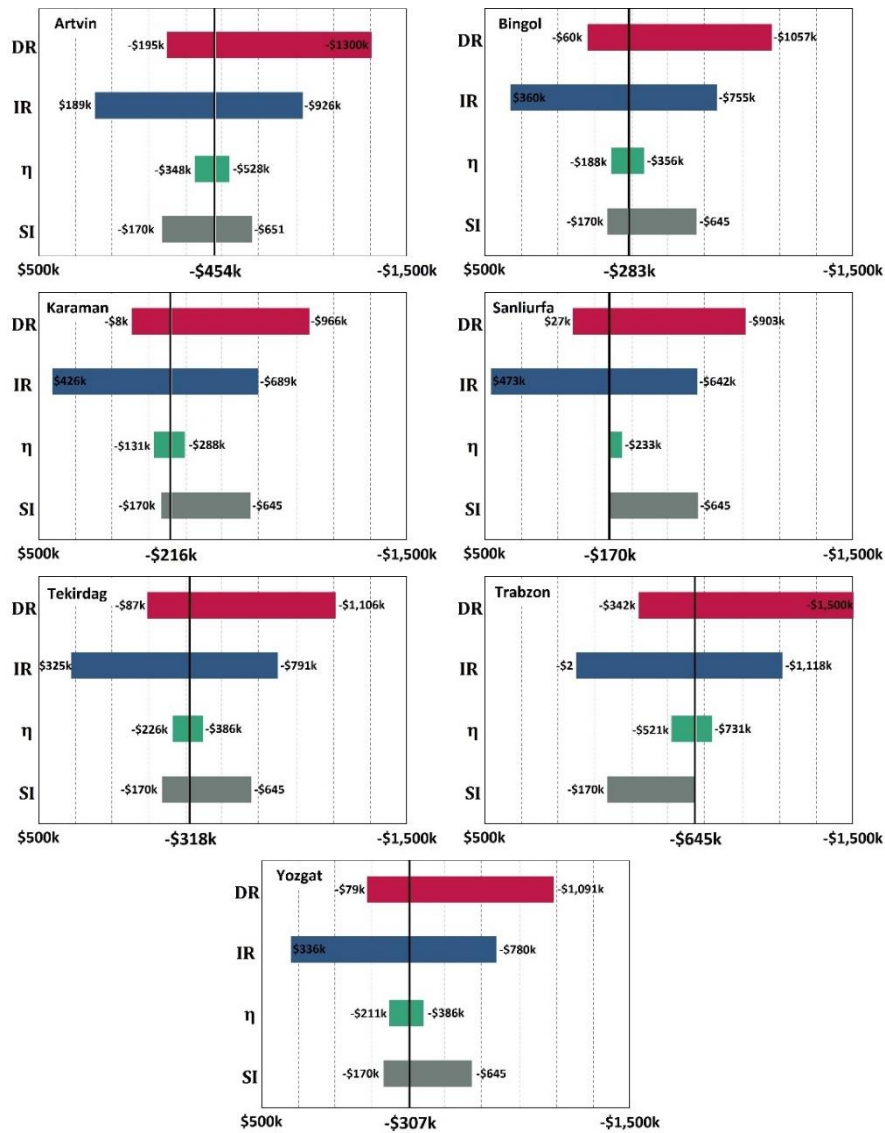


Figure 13. Sensitivity analysis of discount rate (DR), interest rate (IR), module efficiency (η) and solar radiation (SI) on NPV values of utility-scale PV systems.

Considering the competitive LCOE values of utility-scale PV systems and the potential for positive NPV with adequate financial support, large-scale commercial PV projects hold promise as an economically viable and sustainable option for electricity generation in Türkiye's selected cities. Policymakers and financial institutions should collaborate to provide favorable financial conditions and incentives to promote the widespread adoption of utility-scale PV systems, ultimately contributing to a more sustainable and greener energy landscape for the country.

CONCLUSION

This study assessed the technical and economic feasibility of photovoltaic (PV) systems in various cities across Türkiye using the System Advisor Model (SAM). The simulation results provide detailed insights into the electricity generation, losses, efficiency, and economic viability of on-grid, off-grid, and utility-scale PV systems.

The solar radiation received by the cities significantly influenced electricity production, with maximum generation achieved through panel tilt angle optimization and monitoring systems. The capacity factor (CF) of the PV systems varied based on the total surface area of the PV modules and the solar radiation in each location. Sanliurfa and Karaman had the highest CFs because of their higher insolation levels. On the other hand, Trabzon and Artvin, located in northern Türkiye with less sunlight, had lower CFs. Overall, the PV systems in all selected cities, except Trabzon, showed promising capacity factors, even surpassing the average CF of utility-scale PV systems reported in the latest IRENA report.

The financial parameters, including total installed costs, LCOE, LCOS, and NPV, were evaluated to assess the economic viability of PV systems. The LCOE and NPV analyses revealed that on-grid PV systems in all cities, except Trabzon, were at grid parity, indicating that the cost of electricity generated from PV systems was lower or equal to the current electricity prices in the region. Off-grid PV systems, which cost almost twice as much as on-grid systems, showed positive NPV values for all cities, highlighting their financial attractiveness to investors. In contrast, utility-scale PV systems, with an LCOE of 4¢/kWh across all cities, presented a competitive basis for electricity generation. However, the NPV values for utility-scale systems were negative, suggesting that further financial support and incentives are needed to promote the transition to large-scale commercial PV projects.

The sensitivity analysis of LCOE and NPV values provided valuable insights into the impacts of key input parameters such as discount rate, loan rate, PV module efficiency, and solar irradiation. In all PV systems, financial parameters, particularly the discount rate and loan rate, had the most significant influence on both LCOE and NPV. In contrast, solar irradiation had a more substantial impact on LCOE in on-grid and off-grid systems, whereas power efficiency (η) showed a weaker correlation with LCOE in utility-scale PV systems.

The study's results indicate that PV systems hold considerable potential for electricity generation in Türkiye's selected cities. However, certain policies and financial support mechanisms are crucial for maximizing the adoption of PV systems. Favorable interest rates, incentives, and government-backed loan programs would enhance the economic viability of PV projects and encourage their widespread implementation. In addition, advancements in battery technology and cost reductions can improve the feasibility of off-grid PV systems, making them more appealing to investors.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship Contribution Statement

B.A.: Data Curation, Formal Analysis, Investigation, Writing – Original Draft, **S.A.:** Supervision, Writing – Review & Editing, **M.Y.:** Resources, Writing – Review & Editing, **M.S.B.:** Supervision, Software, Writing – Review & Editing **V.U.:** Supervision, Conceptualization, Investigation, Writing - Review & Editing

REFERENCES

- [1] H. Ritchie, M. Roser, P. Rosado, Energy - Fossil Fuels, *Our World in Data*. (2022). <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>.
- [2] J. Twidell, Renewable Energy Resources, 4. bs, *Routledge*, London, 2021. doi:10.4324/9780429452161.
- [3] A.O. Özkan, H.B. Demir, Fotovoltaik Panellerde Sıcaklık ve Zenit Açısının Panel Güç Üretimine Etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (2019) 1-9.
- [4] M.İ. Özgün, A.B. Batıbay, B. Ünal, Y.R. Eker, A. Terlemeç, Investigation of the Use of TiO₂ Obtained from Endodontic NiTi Files in Dye-Sensitized Solar Cells, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5 (2023) 1-8.
- [5] IRENA, Renewable Energy Statistics, 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022> (erişim 27 Aralık 2023).
- [6] IRENA, World Energy Transitions Outlook 1-5C Pathway 2022 Edition, 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>.
- [7] IRENA, Future of solar photovoltaic, *Publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic*. (2019). <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic> (erişim 30 Ağustos 2022).
- [8] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş, (t.y.). <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>.
- [9] C. Hakyemez, Ekonomik Araştırmalar, Aylık Enerji Bülteni, 2022.
- [10] D. Ray, Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis, 2021.
- [11] B. Akgayev, V. Unsur, Evaluation of residential stand alone photovoltaic systems in mega cities of the world, *International Journal of Green Energy*. 21 (2024) 448-460. doi:10.1080/15435075.2023.2276153.
- [12] NREL, System Advisor Model (SAM), (t.y.). <https://sam.nrel.gov/> (erişim 24 Nisan 2021).
- [13] NREL, NSRDB, (2023). <https://nsrdb.nrel.gov/>.
- [14] EU PVGIS, JRC Photovoltaic Geographical Information System, (2023). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY.
- [15] WMO, Climate Data Region 6- Europe/Türkiye, (t.y.). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/default.html.
- [16] SOLARGIS, Global Solar Atlas, (2023). <https://globalsolaratlas.info/map>.
- [17] EnergyPlus, Weather Data, (t.y.). <https://energyplus.net/weather>.
- [18] TEİAŞ, Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri, 2022. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>.
- [19] TÜİK, Enerji İstatistikleri, (t.y.). <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=147&locale=tr>.
- [20] KOSGEB, T.C. Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı, Text *KOSGEB*. (t.y.). <http://www.kosgeb.gov.tr/site/tr/genel/destekdetay/1233/kobi-finansman-destek-programi>.

- [21] TKDK, Yenilenebilir Enerji Yatırımları, 2023. <https://www.tkd.gov.tr/AltTedbir/yenilenebilir-enerji-yatirimlari-16>.
- [22] TTGV, Teknoloji Üreten Türkiye, (2022). <https://www.ttg.gov.tr/tr/programlar>.
- [23] TurSEFF, Yenilenebilir Enerji, (t.y.). <https://www.turseff.org/bilesen/yenilenebilir-enerji?ref=yenilenebilir-enerji>.
- [24] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Yatırım Teşvik Sistemleri, (2023). <https://www.sanayi.gov.tr/anasayfa>.
- [25] O.T. Turhan, G.T. Turhan, Y. Güneri, Enerji Teşvik ve Destekleri, (2023). <https://www.piagrid.com/enerji-tesvik-ve-destekleri>.
- [26] IEEE, IEEE Standards Association, *IEEE Standards Association*. (2023). <https://standards.ieee.org>.
- [27] Jinko Solar, Solar Panels - Tiger Neo, (t.y.). <https://www.jinkosolar.com/en/site/tigerneo#s1>.
- [28] Huawei, A Range of Products that Provide Reliable Solar Solutions | FusionSolar Global, (t.y.). <https://solar.huawei.com/en/professionals/all-products> (erişim 27 Aralık 2023).
- [29] M.S. Endiz, R. Akkaya, Yarı İmpedans Kaynaklı İnverterlerde Farklı PWM Kontrol Tekniklerinin Performans Etkisinin İncelenmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2 (2020) 12-26.
- [30] IEEE, IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stand-Alone Photovoltaic (PV) Systems, *IEEE Std 1013-2019 (Revision of IEEE Std 1013-2007)*. (2019) 1-50. doi:10.1109/IEEESTD.2019.8845030.
- [31] V. Ramasamy, D. Feldman, J. Desai, R. Margolis, U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, 2021. doi:10.2172/1829460.
- [32] H. Walker, E. Lockhart, J. Desai, K. Ardani, G. Klise, O. Lavrova, T. Tansy, J. Deot, B. Fox, A. Pochiraju, Model of Operation-and-Maintenance Costs for Photovoltaic Systems, 2020. doi:10.2172/1659995.
- [33] IRENA, Renewable Power Generation Costs, 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021> (erişim 04 Eylül 2022).
- [34] TCMB, Reeskont ve Avans Faiz Oranları, 2023. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Temel+Faaliyetler/Para+Politikasi/Reeskont+ve+Avans+Faiz+Oranlari>.
- [35] TCMB, Tüketici Fiyatları, 2023. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Enflasyon+Verileri/Tuketici+Fiyatlari>.
- [36] EMO, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, (t.y.). https://www.emo.org.tr/mevzuat/mevzuat_detay.php?kod=74.
- [37] EPDK, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, t.y. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-2256/kanunlar>.
- [38] T.C. Mevzuat Bilgi Sistemi, KANUNLAR - 5346, t.y. <https://www.mevzuat.gov.tr/>.
- [39] Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022, (2022) 26.
- [40] NREL, Levelized Cost of Solar Plus Storage, 2023. <https://www.nrel.gov/news/video/lcoss->

text.html.

- [41] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, I. Staffell, Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, *Joule*. 3 (2019) 81-100. doi:10.1016/j.joule.2018.12.008.
- [42] W. Short, D.J. Packey, T. Holt, A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies, 1995. doi:10.2172/35391.
- [43] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2022, 2023. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-power-generation-costs-in-2022>.
- [44] EPDK, EPDK | Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, (2022). <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari> (erişim 22 Şubat 2023).

Filaman Sarım CETP Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin ve Hasar Gelişiminin Halka Çekme Testi ile İncelenmesi

Lokman GEMİ¹  Mohammad AZEEM²  Şakir YAZMAN³ 
Mehmet KAYRICI⁴  Onur GÖK⁴ 

¹ Necmettin Erbakan University, Meram Vocational School, Konya, Türkiye

² Universiti Teknologi PETRONAS (UTP), Mechanical Engineering Department, Perak, Malaysia

³ Selçuk University, Ilgın Vocational School, Konya, Türkiye

⁴ Necmettin Erbakan University, Dept. Mechanical Engineering, Seydişehir ACMF, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 13.12.2023

Kabul Tarihi: 23.01.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

Delaminasyon,
Filaman sarım,
Halka çekme testi,
Kompozit boru.

Filaman sarım yöntemi ile üretilen kompozit borular; hafiflikleri, korozyon dirençleri ve yüksek mukavemetlerinden dolayı birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Özellikle doğalgaz ve petrol boru hatlarında basınç altında çalışan kompozit borular kullanılacağı alanda taşıyabileceği yükleri karşılayabilmesi için özel tasarımlar yapılmaktadır. Filaman sarım üretim yöntemi ile elyaf türü, elyaf sarım açısı ve tabaka sayısı değiştirilerek ihtiyaca göre farklı özelliklerde ve mukavemetlerde kompozit borular üretilmektedir. Değişken parametreler ışığında üretilen her borunun mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. İç basınç altında çalışan kompozit boruların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden bir tanesi de halka çekme testidir. Bu çalışmada Filaman sarım yöntemi ile $\pm 55^\circ$ elyaf konfigürasyonu ile 72 mm iç çapında ve 1 m boyunda cam elyaf takviyeli plastik (CETP) borular üretilmiştir. Üretilen borulardan ASTM D2290 standardına göre 30 mm genişliğinde 20 mm daraltılmış bölgelere sahip halka çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Deneyler Instron 8801 test cihazında yapılmış ve veriler kaydedilmiştir. Kompozit boruların halka çekme deneyleri sonrasında elde edilen veriler işlenmiş ve grafik haline dönüştürülerek yorumlanmıştır. Deney sonrası hasar bölgeleri yüksek çözünürlüklü olarak fotoğraflanarak ayrıntılı makro ve mikro (SEM) hasar analizi yapılarak oluşan hasar modları belirlenmiştir.

Investigation of Mechanical Properties and Damage Development of Filament Wound GFRP Composite Pipes by Ring Tensile Test

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 13.12.2023

Accepted: 23.01.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Composite pipe,
Delamination,
Filament winding (FW),
Ring test.

Composite pipes produced by the filament winding (FW) method are used in many engineering fields due to their lightness, corrosion resistance and high strength. Composite pipes working under pressure, particularly in natural gas and oil pipelines, are specially designed to withstand the loads they will be exposed to in the area where they are used. With the FW production method, composite pipes with different properties and strengths can be produced according to the needs by changing the fiber type, fiber winding angle and number of layers. In the light of varying parameters, it is necessary to determine the mechanical properties of each pipe produced. One of the methods of determining the mechanical properties of composite pipes operating under internal pressure is the ring tensile test. In this study, glass fiber reinforced plastic (GFRP) pipes with an inner diameter of 72 mm and a length of 1 m with $\pm 55^\circ$ fiber configuration were produced by the FW method. Ring tensile test specimens with 30 mm wide and 20 mm reduced sections were prepared from the produced pipes according to ASTM D2290 standard. Experiments were carried out on an Instron 8801 tester and data were recorded. The data obtained after the ring tensile tests of composite pipes were processed, converted into graphics and interpreted comparatively. After the experiment, the damage areas were photographed at high resolution. Detailed macro and micro (SEM) damage analysis was performed to determine the damage modes.

To cite this article:

Gemi, L., Azeem, M., Yazman, Ş., Kayrıci, M. & Gök, O. (2024). Investigation of mechanical properties and damage development of filament wound GFRP composite pipes by ring tensile test, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 93-104. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.34>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Lokman Gemi, lgemi@erbakan.edu.tr



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

INTRODUCTION

Composite materials have begun to replace traditional materials in aerospace, aviation, and defense industries and other engineering applications where weight is important. Composites produced in different geometries and components are classified according to the types of reinforcement used [1-4]. Commonly used polymer matrix composites are classified as fiber-reinforced (FRP) [5-9], nanofiber-reinforced [10-13] and nanoparticle-reinforced [14-18]. In order to determine the mechanical properties of composites that can be produced by different methods, they are subjected to a series of tests such as tensile, compression [19-21], fatigue [22-26], burst [27-31], buckling, vibration and low-velocity impact [32-36]. Determination of the mechanical properties of composite pipes and high-pressure tubes exposed to internal pressure must be made according to certain standards that are valid worldwide [37]. The main ones are the American Petroleum Institute (API) and the American Society for Testing and Materials (ASTM). The strength tests of composite pipes used in natural gas and oil transmission are carried out by exposing them to load in the radial direction. The maximum strength values of the composite pipes, which are tested until they are damaged under these loading conditions, are determined in an open-ended manner. One of the main tests is internal pressure bursting tests as specified in the ASTM D1599 standard. This test is known as one of the most accurate tests in the literature. Many researchers have carried out studies to determine the strength values of composite pipes produced from different fiber types [38, 39]. When the studies in the literature were examined, it was seen that different special sealed apparatuses were designed to apply internal pressure to the pipes produced. These apparatuses, fitted with high-pressure seals, are placed inside the composite pipes and connected to a hydraulic pump. Before starting the experiments, the liquid was filled into the area limited by the apparatus. Stresses in the radial direction (Hoop) are created on the pipes pressurized by a hydraulic pump and the loading is continued until they are damaged [40, 41]. In many studies conducted in the literature, the strength values of composite pipes have been obtained and their damage developments have also been examined. The damage modes occurring in the burst tests of GFRP FW pipes with different winding angles were determined as; outer surface matrix cracking, whitening where the matrix structure started to deteriorate, debonding damages in the fiber direction, intense whitening with the increase of pipe diameter, delamination, droplet leakage, intense leakage in the form of water jet and explosion damages with fiber breaks [4, 41-43]. As can be seen from the literature, bursting tests are quite laborious as many equipment and hydraulic units are used. One of the alternative strength determination tests is the ring tensile test, known as the ASTM D2290 standard. When the standard is examined, it can be seen that this test is simpler than the burst test and can be applied on any tensile device. When the studies in the literature are examined, it is seen that apparatuses have been prepared for pipes of different diameters and can be adjusted according to existing tensile tester. When the studies in the literature are examined; It can be seen that apparatus has been prepared for pipes of different diameters produced and can be adjusted according to the existing tester [44-46]. Obtaining fast results with this test, small sample sizes used and easy applicability have become the reason for preference of researchers [47-51]. Kaynak et al. applied split-disc tests to composite pipes manufactured with two different resin systems, five different fibers and winding angles [52]. It was concluded that split-disc tests were effective in determining the performance of the pipes. Gemi et al. comparatively investigated the effect of stacking sequence on the strength of FW hybrid pipes manufactured in the $[\pm 55^\circ]_3$ configuration by internal pressure and ring test [53, 54]. They found that the strength test results were 15-30% lower than the burst test results due to the disruption of fiber continuity and the reduction of sample sizes in the filament wound pipes prepared for the ring tensile test. In addition, although an apparatus is used to minimize the moment effect in the ring tensile test, this effect is

not completely eliminated, so there is a difference in the behavior compared to the under internal pressure. Because there is no bending moment effect due to axial symmetry in pipes subjected to internal pressure. For this reason, while apparent hoop tensile strength is obtained from the ring tensile test, real hoop tensile strength is obtained from the burst test performed under internal pressure. In the literature, damage analyzes are also included in studies conducted with ring tensile tests and damage developments are mentioned. It is stated that the damages are concentrated in reduced sections and the fiber winding configurations affect the damage development.

MATERIALS AND METHODS

The GFRP pipes used for this experimental study were produced using the facilities of İzmir İzoreel composite company. In the production of pipes, the FW method was used, which meets all winding parameter needs. The data obtained as a result of the literature review was effective in determining the pipes used and their parameters. The ring tensile test method, which is one of the fastest tests used to determine the approximate mechanical properties of the composite pipe, was used. Tests were made on the Instron 8801 tensile tester. In order to perform the tests, a ring tensile test apparatus suitable for the tester was designed and used. The obtained data were recorded and stress-strain graphs were drawn. During and after the experiment, GFRP composite pipe samples were examined in detail and interpreted by damage analysis.

Manufacturing of the Composite Pipes

A steel mandrel with a diameter of 72 mm has been specially designed for the production of composite pipes. E glass (1200 tex - 17 μm diameter) was used as reinforcement material. Momentive (Bisphenol A-Epikote 828) resin was used as the matrix material. Epicure 875 was used as a hardener in the resin system to accelerate the polymerization process. In the resin/hardener system, an additive ratio of 100:80 by weight was used. Before starting production, mold release material was applied to the mandrel (QZ-13). For the pipe design, a program was written on the CNC filament winding machine and the number of bobbins required for the winding width was determined. Fiber winding angle configuration $[\pm 55^\circ]_3$ has been determined. The pipes were produced with a total of 6 layers of wet winding, with an inner diameter of 72 mm and an outer diameter of 76.8 mm (Figure 1). After the winding process, the composite pipe-wrapped mandrel was removed from the FW machine and placed in the curing oven. The oven curing process was carried out at 135 $^\circ\text{C}$ and 150 $^\circ\text{C}$ for two hours each. The produced pipes were cut into 300 mm dimensions and prepared for use in experimental studies.

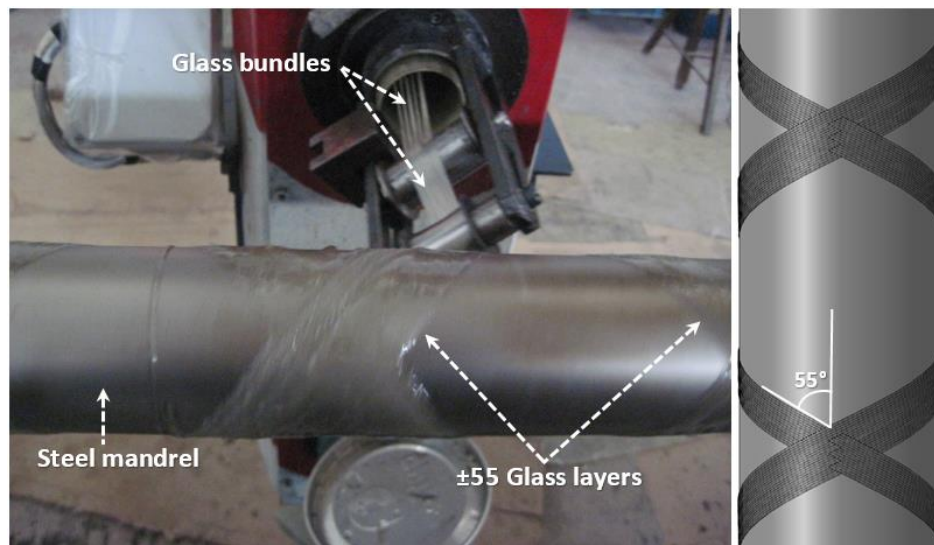


Figure 1. *Production of GFRP composite pipes with the FW method*

Ring tensile test

Ring tensile test samples were prepared according to ASTM D2290 standard [48, 55]. The stage of preparing samples from composite pipes in accordance with the standard is shown in Figure 2. Marking was carried out on the pipes for a sample width of 30 mm and a reduced sections of 20 mm. After marking, drilling was performed on a universal drill machine to prepare the reduced sections. In order to prevent hole exit damages such as push-out delamination during drilling, a 72 mm diameter wooden back-up was manufactured to be placed inside the composite pipes. In order to create reduced sections of the samples in standard sizes, drilling operations were carried out using the advancement mechanism with mm divisions on the bench. Radial cutting process was applied to the composite pipes with marking and reduced sections prepared and ring test samples were obtained. After the cutting process, the sample dimensions were checked and the cut surfaces were ground with wet sandpaper as needed. Tensile tests were carried out after the prepared samples were mounted on the apparatus. The machine speed was set as 2 mm/min during the tension process. After the gaps of the apparatus were eliminated, the loading process was started. Tensile data of three repeated tests were recorded.

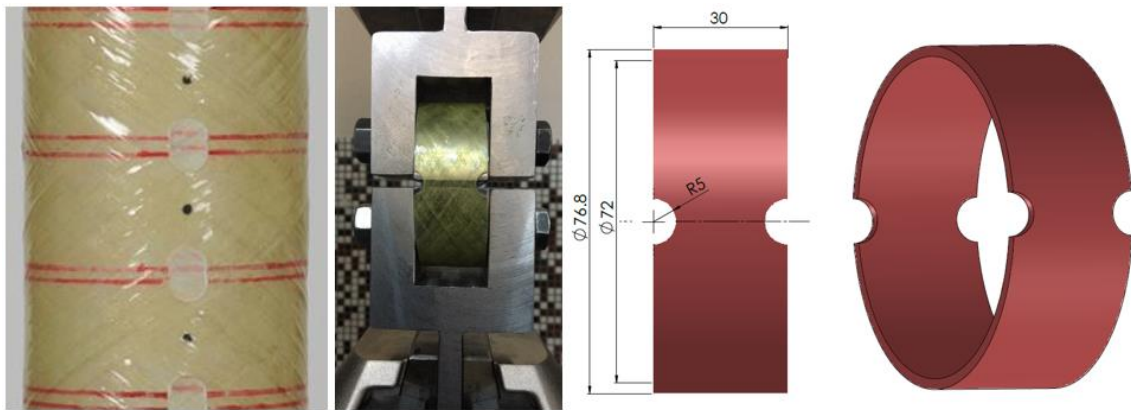


Figure 2. Ring test sample preparation stage and sample geometry.

Damage analysis

After the tensile test, macro and micro damage analysis was performed on the damaged samples. For macro damage analysis, images of the outer and inner parts of the specimens were taken with high resolution cameras in studio conditions (Figure 3). For micro damage analysis, images obtained from optical microscope and SEM device were used (Figure 4). Micro-scale damages in the damage areas were detected and interpreted by processing on the images.

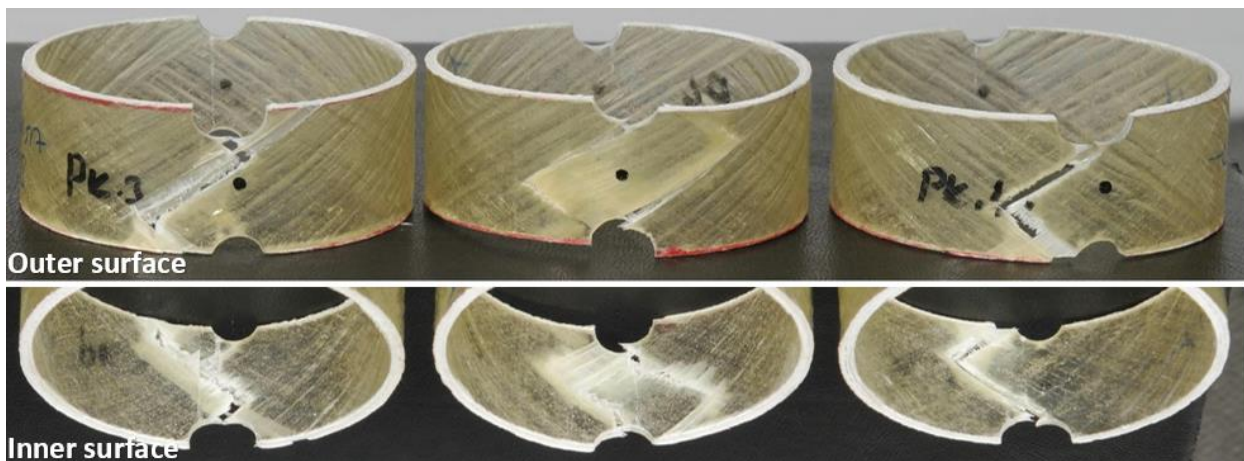


Figure 3. Outer and inner surface images of damaged specimens after the test

RESULTS

The load-elongation data recorded during tensile tests were analyzed and stress-strain graphs were drawn. During the processing of the data, the area calculation was made by taking into account the reduced section on both sides of the ring tensile specimen during calculating the stress. The stress-strain graphs obtained as a result of the processed data are given in Figure 5, and the maximum stress and strain values are given in Table 1. When Figure 5 and Table 1 were examined comparatively, it is seen that although the maximum stress values obtained in the three tests were close to each other, there are some differences in the strain values. It is thought that these differences are due to the fact that the excess resin accumulated on the sample after the winding of the last layer in the sample production cannot be removed homogeneously. It is understood that the mechanical properties of the samples taken from resin-rich areas differ (Test-3).



Figure 4. *Optical microscope and SEM device used for damage analysis*

As a result of the observations made during the experiment, significant damage development was observed in the specimens loaded at a speed of 2 mm/min [55]. The onset of damage was determined as an average stress value of 250 MPa in all three specimens. It was observed that the damage first occurred in the resin-rich zone in the reduced section, where matrix cracks and crazing-whitening occurred in the direction of the fiber winding angle. As the loading continued, debonding damage occurred in certain areas due to whitening in the fiber direction.

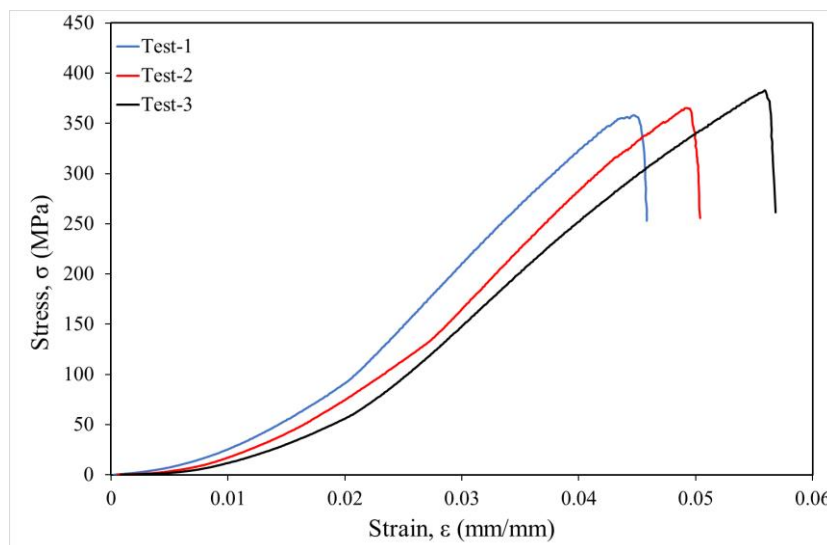


Figure 5. *Stress-strain graphs obtained after ring test*

It was observed that delamination damage started at the 337 MPa stress level in areas where whitening and debonding were intense. It was observed that with increasing load, some fibers began to break at the radius edges of the reduced section and fiber pull-outs occurred with the angular direction change. It was observed that with increasing load, some fibers started to break at the radial edges of the reduced section and fiber pull-outs/fracture layer occurred with angular direction change. At an average stress level of 368 MPa, catastrophic damage started in the direction of -55° winding angle. The final damage was caused by splitting and fracture layers and pull-out of the fiber bundles in the $+55^\circ$ layer.

Table 1. Maximum Stress-Strain values after the test

No	Max. Stress (σ) MPa	Max. Strain (ϵ) mm/mm
Test-1	358	0.0458
Test-2	365	0.0504
Test-3	382	0.0568
Average	368.3	0.051

Figure 6 shows comparative images of the outer and inner surface of the damaged specimens. When the macro damages were analyzed, it was observed that the damages started from the ends of the reduced section. Subsequently, it is seen that the damage progresses in the direction of -55° winding angle and occurs in the form of brittle fracture in the layers. It was observed that the damages progressing in the -55° fiber winding direction reached a certain size and changed direction towards the $+55^\circ$ winding direction (Test-1, Test-2). Especially when the Test-2 specimen is examined, it is understood that fracture occurs with the onset of double-sided damage in the layers and when it reaches a certain stage, the fracture changes direction. When the damages in all three specimens are examined, it is seen that severe delamination and matrix crack damages occurred in the fracture direction.

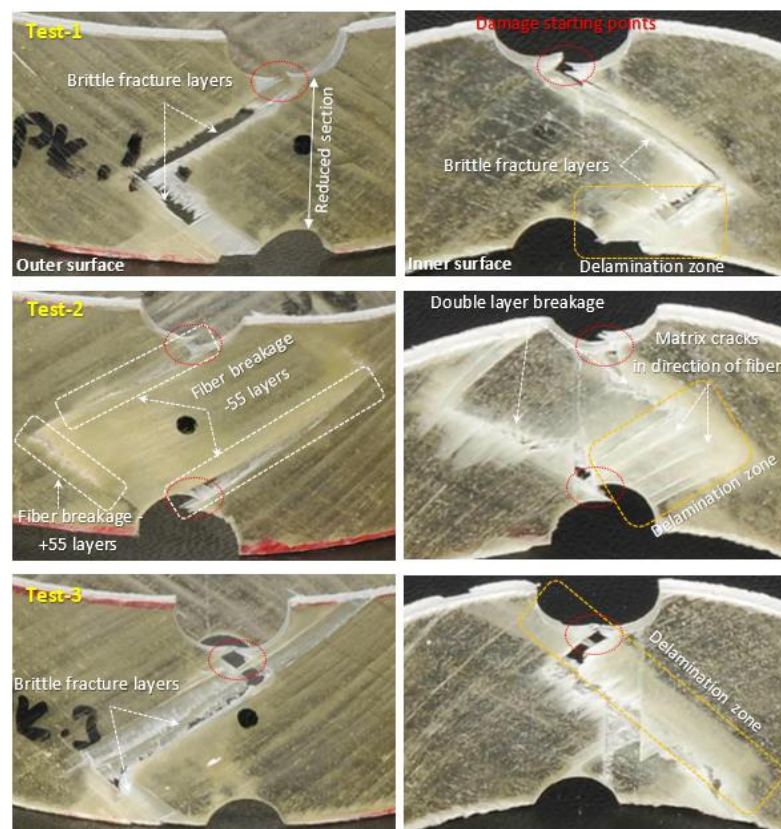


Figure 6. Macro damage analysis of samples after ring test

After the macro damage analysis, a general cross-sectional image was taken from the damaged area of the Test-3 specimen with an optical microscope. After the cross-sectional image examinations,

the specimen was removed from the damage zone where brittle fracture occurred for SEM analysis. The damages occurring in the fracture zone and within the layer were examined in detail by SEM analysis (Figure 7). When the image given in Figure 7a is examined, it is seen that fracture, layer fractures and delamination damages occur in the direction of the winding angle. In Figure 7b, the general view of the damage zone is photographed by SEM and the layer stacking is analyzed. It was determined that the -55° layer suffered from multiple damage in addition to delamination. Figure 7d and 7e shows the micro analysis of debonding and fiber fracture damage on the fracture surface. Figure 7c shows the debonding damage caused by radial cracks near the fracture zone. In the reduced sections of the specimen, the damage modes detected before the final failure also occurred during fracture and spread throughout the damage zone.

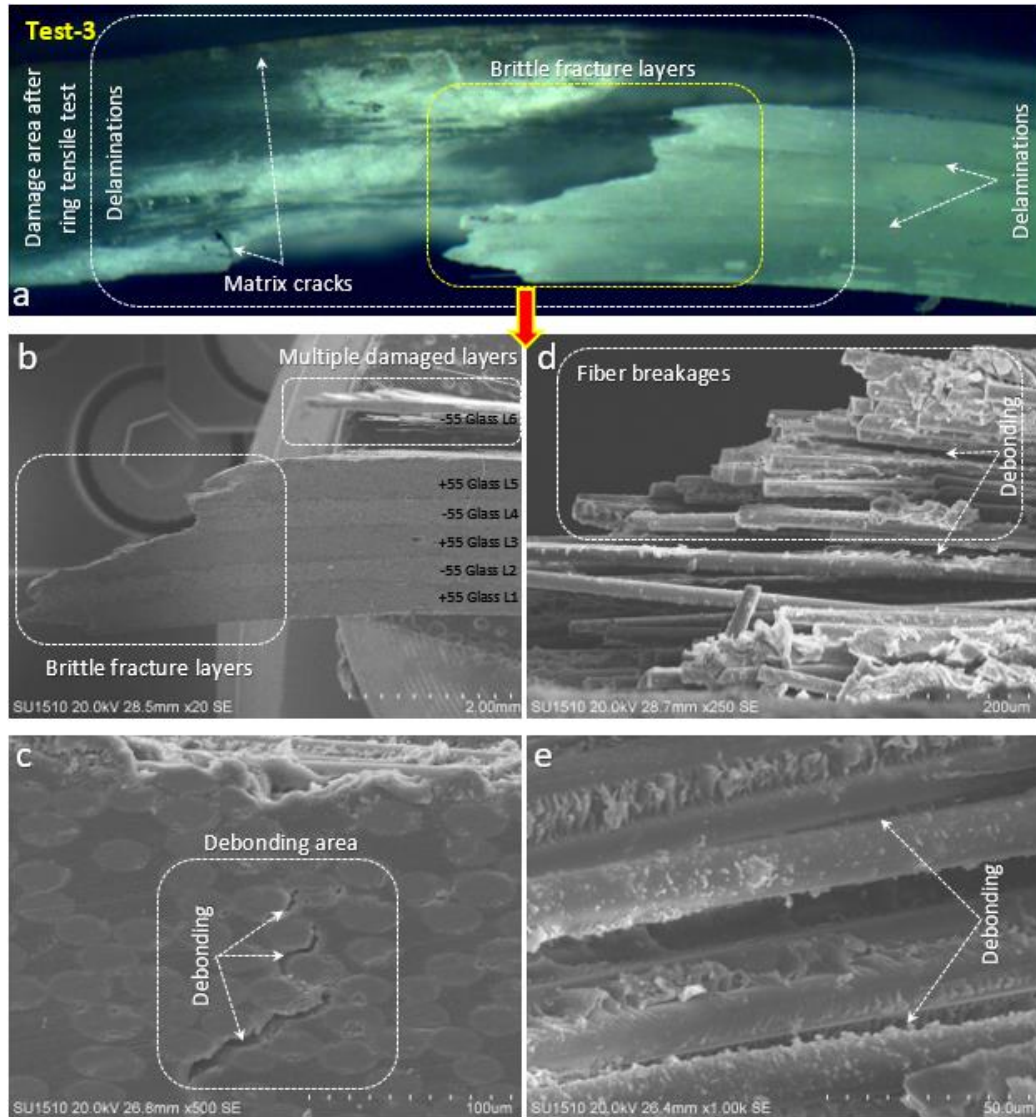


Figure 7. Micro damage analysis of samples after ring test

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this study, the mechanical properties of GFRP composite pipes produced by filament winding method were determined by ring tensile test and the damage development of the material during the test was analysed. In the detailed damage analysis, damage modes were determined and the behaviour of layered composites produced by filament winding method under radial load was interpreted and following conclusions are drawn:

- Although the ring tensile test specimens were cut from the same pipes, it was observed that there were differences in their mechanical properties. The maximum strengths of the pipes were close to each other and reached up to an average value of 368 MPa (Max. Stress- σ). The maximum % strain results varied between 0.045-0.057 mm/mm (Max. Strain- ϵ). The reason for this is thought to be that there are local resin-rich regions on the composite pipe due to the production method and the reduced sections coincide with these regions.
- All of the damage to the specimen occurred in the reduced sections. Damage initiation occurred at the ends of the reduced sections. In all three specimens, the progression of damage occurred in the fiber direction in the -55° layer and the fractures were found to change direction in the $+55^\circ$ layer direction after a certain point.
- The damage modes were as follows: matrix cracking, crazing, debonding, delamination, fiber fractures, layer fractures in the fiber direction, and fiber bundle pull-out during fracture.
- From the literature reviews conducted for this study, it is understood that the hoop tensile strength obtained from ring tensile test are 15-30% lower than the strength values obtained from static burst under internal pressure of open-end pipes. The reason for this is thought to be the change in sample dimensions (shrinkage in the axial direction) and disruption of fiber continuity. Also, in the ring tensile test, the apparent hoop tensile strength is obtained due to the bending moment, while in the burst test, the real hoop tensile strength is obtained.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship Contribution Statement

L.G.: Conceptualization, Resources, Formal Analysis, Writing - Original Draft, Resources, **M.A.:** Writing - Review & Editing, Supervision, **S.Y.:** Investigation, Data Curation, Formal Analysis, **M.K.:** Methodology, Writing - Review & Editing, **O.G.:** Data Curation, Writing - Review & Editing

REFERENCES

- [1] S. Morkavuk, U. Köklü, K. Aslantaş, An experimental investigation on the influence of different surface curvatures in drilling machinability of carbon fiber reinforced plastic, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 236 (2022), 10953-10968. doi:10.1177/09544062221110466
- [2] K. Giasin, M. Atif, Y. Ma *et al.*, Machining GLARE fibre metal laminates: a comparative study on drilling effect between conventional and ultrasonic-assisted drilling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 123, (2022), 3657-3672. doi:10.1007/s00170-022-10297-x
- [3] U. Köklü, O. Demir, A. Avcı *et al.*, Drilling performance of functionally graded composite: Comparison with glass and carbon/epoxy composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 31 (2017) 4703-4709. doi:10.1007/s12206-017-0916-4
- [4] M. Taşyürek, N. Tarakçıoğlu, Damage behavior of filament winding pipes modified with carbon nanotubes under internal pressure, *Journal of Polytechnic-Politeknik Dergisi*. 18 (2015), 211-217. doi:10.2339/2015.18.4 211-217
- [5] E. Madenci, Y.O. Özkılıç, L. Gemi, Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations, *Composite Structures*. 254 (2020), 112806. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112806
- [6] Ş. Yazman, The effects of back-up on drilling machinability of filament wound GFRP composite pipes: Mechanical characterization and drilling tests, *Journal of Manufacturing Processes*. 68 (2021), 1535-1552. doi:10.1016/j.jmapro.2021.06.054
- [7] E. Madenci, “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Plakların Statik Analizinde Mikro-Mekanik Modellerin Katkısı,” *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5 (2023), 23-37. doi:10.47112/neufmbd.2023.7
- [8] M. A. Doğan, Ş. Yazman, L. Gemi *et al.*, A review on drilling of FML stacks with conventional and unconventional processing methods under different conditions, *Composite Structures*. 297 (2022), 115913. doi:10.1016/j.compstruct.2022.115913
- [9] U. Köklü, M. Mayda, S. Morkavuk *et al.*, Optimization and prediction of thrust force, vibration and delamination in drilling of functionally graded composite using Taguchi, ANOVA and ANN analysis, *Materials Research Express*. 6 (2019), 085335. doi:10.1088/2053-1591/ab2617
- [10] E. Uslu, M. Gavgali, M. O. Erdal *et al.*, Determination of mechanical properties of polymer matrix composites reinforced with electrospinning N66, PAN, PVA and PVC nanofibers: A comparative study, *Materials Today Communications*. 26 (2021), 101939. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101939
- [11] M. O. Erdal, Ş. Yazman, L. Gemi *et al.*, The effect of nonwoven electrospun PAN nanofiber mat on mechanical and thermal properties of epoxy composites, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 22 (2018), 528-535. doi:10.19113/sdufbed.81545
- [12] M. Uyaner, and A. Yar, Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (2019), 10-19.
- [13] D. Renjadi Neelappa, S. Keerikadu, and L. K. S. Ramamurthy, Fabrication and characterization of bio composite fiber boards from areca leaf sheaths, *Journal of Materials and Manufacturing*. 2 (2023), 44-53. doi:10.5281/zenodo.8023070
- [14] L. Gemi, Ş. Yazman, M. Uludağ *et al.*, The effect of 0.5 wt% additions of carbon nanotubes and ceramic nanoparticles on tensile properties of epoxy-matrix composites: a comparative study, *Mater Sci Nanotechnol*. 1(2) (2017), 15-22. doi:10.35841/nanotechnology.1.2.15-22
- [15] S. Khammassi, M. Tarfaoui, Y. Qureshi *et al.*, Mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced epikote 828 under dynamic compression, *Mechanics of Materials*. 158 (2021), 103873. doi:10.1016/j.mechmat.2021.103873

- [16] H. Sepetcioglu, N. Tarakcioglu, and R. Rafiee, Experimental investigation of graphene nanoplatelets effect on the fatigue behavior of basalt/epoxy composite pressure vessels, *Thin-Walled Structures*. 171 (2022), 108672. doi:10.1016/j.tws.2021.108672
- [17] İ. Akin, E. Zor, H. Bingöl, GO@Fe₃O₄ Katkılı Polimerik Kompozit Membranların Hazırlanması ve Karakterizasyonu, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5 (2023), 38-52. doi:10.47112/neufmbd.2023.8
- [18] Ş. Bulbul, E. Ayhan, H. Gökmeşe, Termik Santral Atığı Olan Kömür Külünün SBR Matrisli Bileşiklere İlave Edilmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5 (2023), 135-146. doi:10.47112/neufmbd.2023.14
- [19] D.S. Gemi, Ö.S. Şahin, L. Gemi, Experimental investigation of axial compression behavior after low velocity impact of glass fiber reinforced filament wound pipes with different diameter, *Composite Structures*. 280 (2022), 114929. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114929
- [20] L. Gemi, M. A. Köroğlu, A. Ashour, Experimental study on compressive behavior and failure analysis of composite concrete confined by glass/epoxy $\pm 55^\circ$ filament wound pipes, *Composite Structures*. 187 (2018), 157-168. doi:10.1016/j.compstruct.2017.12.049
- [21] Q. Ma, M. R. M. Rejab, M. Azeem *et al.*, Axial and radial crushing behaviour of thin-walled carbon fiber-reinforced polymer tubes fabricated by the real-time winding angle measurement system, *Forces in Mechanics*. 10 (2023), 100170. doi:10.1016/j.finmec.2023.100170
- [22] L. Gemi, Ö.S. Şahin, A. Akdemir, Experimental investigation of fatigue damage formation of hybrid pipes subjected to impact loading under internal pre-stress, *Composites Part B: Engineering*. 119 (2017), 196-205. doi:10.1016/j.compositesb.2017.03.051
- [23] L. Gemi, N. Tarakçıoğlu, A. Akdemir, Ö.S. Şahin, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75)₂ filament-wound pipes under pure internal pressure, *Materials & Design*. 30 (2009), 4293-4298. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.025
- [24] N. Tarakçıoğlu, L. Gemi, A. Yapici, Fatigue failure behavior of glass/epoxy ± 55 filament wound pipes under internal pressure, *Composites Science and Technology*. 65 (2005), 703-708. doi:10.1016/j.compscitech.2004.10.002
- [25] H. Sepetcioglu, Experimental study on the effect of graphene nanoplatelets on the low-velocity impact response of prestressed filament wound basalt-based composite pressure vessels, *Polymer Composites*. 42 (2021), 5527-5540. doi:10.1002/pc.26243
- [26] S. Morkavuk, K. Aslantaş, L. Gemi *et al.*, The influence of drilling-induced damages and hole quality on hoop tensile and fatigue behavior of CFRP tubes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 179 (2024), 108005. doi:10.1016/j.compositesa.2024.108005
- [27] L. Gemi, Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study, *Composites Part B: Engineering*. 153 (2018), 217-232. doi:10.1016/j.compositesb.2018.07.056
- [28] L. Gemi, M. Kara, A. Avci, Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes, *Composites Part B: Engineering*. 106 (2016), 154-163. doi:10.1016/j.compositesb.2016.09.025
- [29] M. Kara, M. Uyaner, A. Avci, Repairing impact damaged fiber reinforced composite pipes by external wrapping with composite patches, *Composite Structures*. 123 (2015), 1-8. doi:10.1016/j.compstruct.2014.12.017
- [30] M. Kara, M. Uyaner, A. Avci *et al.*, Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength, *Composites Part B: Engineering*. 60 (2014), 507-514. doi:10.1016/j.compositesb.2014.01.003
- [31] M. Azeem, H. H. Ya, M. Azad Alam *et al.*, Influence of winding angles on hoop stress in composite pressure vessels: Finite element analysis, *Results in Engineering*. 21 (2024), 101667. doi:10.1016/j.rineng.2023.101667

- [32] D. S. Gemi, Ö. S. Şahin, and L. Gemi, Experimental investigation of the effect of diameter upon low velocity impact response of glass fiber reinforced composite pipes, *Composite Structures*. 275 (2021), 114428. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114428
- [33] L. Gemi, M. Kayrıçı, M. Uludağ *et al.*, Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes, *Composites Part B: Engineering*. 149 (2018), 38-48. doi:10.1016/j.compositesb.2018.05.006
- [34] A. Maziz, M. Tarfaoui, L. Gemi *et al.*, A progressive damage model for pressurized filament-wound hybrid composite pipe under low-velocity impact, *Composite Structures*. 276 (2021), 114520. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114520
- [35] A. Maziz, M. Tarfaoui, S. Rechak *et al.*, Finite Element Analysis of Impact-Induced Damage in Pressurized Hybrid Composites Pipes, *International Journal of Applied Mechanics*. 13 (2021), 2150074. doi:10.1142/s1758825121500745
- [36] M. Azeem, H. H. Ya, M. A. Alam *et al.*, Impact response of filament-wound structure with polymeric liner: Experimental and numerical investigation (Part-A), *Results in Engineering*. 21 (2024), 101730. doi:10.1016/j.rineng.2023.101730
- [37] M. Azeem, H. H. Ya, M. A. Alam *et al.*, Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review, *Journal of Energy Storage*. 49 (2022), 103468. doi:10.1016/j.est.2021.103468
- [38] R. Rafiee, A. Salehi, Estimating the burst pressure of a filament wound composite pressure vessel using two-scale and multi-scale analyses, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 30 (2023), 2668-2683. doi:10.1080/15376494.2022.2062077
- [39] R. Rafiee, A. Salehi, A novel recursive multi-scale modeling for predicting the burst pressure of filament wound composite pressure vessels, *Applied Physics A*, 128 (2022), 388. doi:10.1007/s00339-022-05505-0
- [40] A. Onder, O. Sayman, T. Dogan *et al.*, Burst failure load of composite pressure vessels, *Composite Structures*. 89 (2009), 159-166. doi:10.1016/j.compstruct.2008.06.021
- [41] M. Taşyürek, N. Tarakçıoğlu, Enhanced fatigue behavior under internal pressure of CNT reinforced filament wound cracked pipes, *Composites Part B: Engineering*. 124 (2017), 23-30. doi:10.1016/j.compositesb.2017.05.050
- [42] M. Taşyürek, M. Kara, Low-velocity impact response of pre-stressed glass fiber/nanotube filled epoxy composite tubes, *Journal of Composite Materials*. 55 (2021), 915-926. doi:10.1177/0021998320961552
- [43] F.M.L. Rekbi, Ö. Özbek, L. Gemi *et al.*, Impact response of filament wound composite structures under various velocity regimes: A state-of-art review, *Functional Composites and Structures*. (2024), In press
- [44] H. Benyahia, M. Tarfaoui, A. El Moumen *et al.*, Prediction of notched strength for cylindrical composites pipes under tensile loading conditions, *Composites Part B: Engineering*. 150 (2018), 104-114. doi:10.1016/j.compositesb.2018.05.051
- [45] M. Tarfaoui, P.B. Gning, L. Hamitouche, Dynamic response and damage modeling of glass/epoxy tubular structures: Numerical investigation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 39 (2008), 1-12. doi:10.1016/j.compositesa.2007.10.001
- [46] M.T. Demirci, N. Tarakçıoğlu, A. Avcı *et al.*, Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO₂ nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method, *Composites Part B: Engineering*. 119 (2017), 114-124. doi:10.1016/j.compositesb.2017.03.045
- [47] F. Saghiri, S. Gohari, F. Mozafari *et al.*, Mechanical characterization of particulated FRP composite pipes: A comprehensive experimental study, *Polymer Testing*. 93 (2021), 107001. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.107001

- [48] M. Stamenović, S. Putić, S. Drmanić *et al.*, The influence of service solutions on the longitudinal and circumferential tensile properties of glass-polyester composite pipes, *Materials Science*. 47 (2011), 61-69. doi:10.1007/s11003-011-9368-7
- [49] W. Toh, L.B. Tan, K.M. Tse *et al.*, Material characterization of filament-wound composite pipes, *Composite Structures*. 206 (2018), 474-483. doi:10.1016/j.compstruct.2018.08.049
- [50] E.N. Buarque, and J.R.M. d'Almeida, The effect of cylindrical defects on the tensile strength of glass fiber/vinyl-ester matrix reinforced composite pipes, *Composite Structures*. 79 (2007), 270-279. doi:10.1016/j.compstruct.2006.01.011
- [51] Ö. Özbek, Ö.Y. Bozkurt, Hoop tensile and compression behavior of glass-carbon intraply hybrid fiber reinforced filament wound composite pipes, *Materials Testing*. 61 (2019), 763-769. doi:10.3139/120.111395
- [52] C. Kaynak, E. Salim Erdiller, L. Parnas *et al.*, Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes, *Polymer Testing*. 24 (2005), 648-655. doi:10.1016/j.polymertesting.2005.03.012
- [53] L. Gemi, U. Köklü, Ş. Yazman *et al.*, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, *Composites Part B: Engineering*. 186 (2020), 107787. doi:10.1016/j.compositesb.2020.107787
- [54] L. Gemi, S. Morkavuk, U. Köklü *et al.*, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, *Composite Structures*. 235 (2020), 111737. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111737
- [55] ASTM, D2290-19A, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe, 2992 (2019). doi:10.1520/D2290-19A

Aylık Yağış ve Bağıl Nemdeki Eğilimlerin Değerlendirilmesi: Konya'da İklim Değişikliği Referansı İçin Kapsamlı Bir Analiz

Kağan ERYÜRÜK¹  Şule ERYÜRÜK² 

¹ Necmettin Erbakan University, Graduate School of Science, Department of Civil Engineering,
Konya, Türkiye

² K.T.O. Karatay University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Industrial
Engineering, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 29.11.2023

Kabul Tarihi: 25.01.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

Bağıl nem,
Mann-Kendall test,
Sen'in trend eğimi,
Trend analizi,
Yağış.

Konya ili ekilebilir arazi bakımından yüksek bir orana sahip olduğu için ve Konya ilinde yağışın mevsimsel değişkenlik göstermesinden dolayı bu çalışmada Konya ili için bağıl nem ve yağış trend analizi araştırılmıştır. Türkiye Devlet Meteoroloji Dairesi, 1929'dan 2020'ye kadar 91 yıllık dönemi kapsayan bağıl nem ve yağış miktarına ilişkin istatistikler sağlanmıştır. Yağışın ve bağıl nemin içinde bulunduğu meteorolojik verilerin trend analizinin incelenmesi için Mann Kendall Testi ve Sen'in Trend Eğim Metodu kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yağış verileri için Kendall'in tau değerlerinin Ocak'tan Aralık ayına kadar -0,087 ile 0,121 arasında değiştiği ve değerlerin çoğunluğunun sıfıra yakın olduğu belirlenmiştir. Çoğu p değeri 0,05'ten büyük olarak hesaplanmıştır ve Sen'in eğimi değerlerinin aylık yağış için -0,087 ile 0,121 arasında değiştiği belirlenmiştir. Sonuçlara bağlı olarak Kendall'in tau ve Sen'in eğimi değerleri sıfıra yakın ve p değerleri yüksektir; bu durum aylık ortalama yağış eğilimlerinde istatistiksel anlamlılık eksikliğine işaret etmektedir. Bağıl nem verileri için Kendall'in tau değer aralığı -0,007 ile -0,248 olarak hesaplanmıştır ve p değerleri birkaç ayda (Ocak, Haziran, Aralık) 0,05'ten az bulunmuştur. Sen'in eğimi değerleri ise 0,076 ile 0,000 aralığında değiştiği saptanmıştır. Sen'in eğimi ve Mann-Kendall testi, istatistik açısından üç ay boyunca (Ocak, Haziran ve Aralık) bağıl nem azalma yönünde önemli bir eğilim olduğunu, ancak ortalama bağıl nem için diğer aylarda bu eğilimin olmadığını göstermektedir. İklim değişikliği tahmin edilirken, Konya'nın bağıl nem ve yağış oranlarında önemli farklılıklar öngörmeyen senaryo ve iklim modellerinin yol gösterici olabileceği söylenebilir.

Assessing Trends in Monthly Precipitation and Relative Humidity: An Analysis for Climate Change Reference in Konya

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 29.11.2023

Accepted: 25.01.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Mann-Kendall test,
Precipitation,
Relative humidity,
Sen's trend slope,
Trend Analysis.

Due to the high proportion of arable land in the province of Konya and the seasonal variability in rainfall in this region, this study investigates the trend analysis of relative humidity and precipitation for the province of Konya. The Turkish State Meteorological Service provided the statistics on relative humidity and the amount of precipitation covering a 91-year span from 1929 to 2020. Mann Kendall Test and Sen's Trend Slope Method were used at 95% confidence level to investigate the trend analysis of meteorological data of relative humidity and precipitation. In the lights of analysis, the values range from -0.087 to 0.121 for the months of January through December, with the majority of values being near 0 for Kendall's tau, most p-values are larger than 0.05, and the values for Sen's slope range from -0.087 to 0.121 for the monthly precipitation. Depending on the results, the values for Kendall's tau and Sen's slope are close to zero, and the p-values are high, indicating a lack of statistical significance in the trends for the average monthly precipitation. The range of values is -0.007 to -0.248 for Kendall's tau, p-values are less than 0.05 in a few months (January, June, December), and 0.076 to 0.000 is the range of values Sen's slope for average relative humidity. Sen's slope and the Mann-Kendall test indicate that there is a significant tendency toward a decreasing relative humidity for three months (January, June, and December) in terms of statistics but not for the other months for average relative humidity. It was suggested that when predicting climate change, scenarios and climate models that do not predict significant differences in Konya's relative humidity and precipitation could be considered as a guide.

To cite this article:

Eryürük, K. & Eryürük, Ş. (2024). Assessing trends in monthly precipitation and relative humidity: an analysis for climate change reference in Konya, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 105-114. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.35>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Kağan Eryürük, keryuruk@erbakan.edu.tr



INTRODUCTION

Relative humidity (RH) is the percentage that represents the level of moisture in the air relative to its maximum capacity at a given temperature [1]. Relative humidity plays a significant role in various aspects such as human well-being, hydrological research, agriculture, and irrigation management [2-3]. Unusually high or low levels of relative humidity can have detrimental effects on human health, including the increased risk of illnesses such as colds, flu, nosebleeds, asthma attacks, and allergies [4-6]. Additionally, elevated relative humidity can contribute to increased precipitation, which may have adverse consequences for the economy [4-6]. Prediction of humidity is also becoming crucial because of the factors mentioned above [7].

The balanced and sustainable use of national and international water resources required for irrigation, energy production, and industrial and domestic activities is increasingly being impacted by factors such as changing demographics, migrations, non-planned urbanization, land and water usage, and other external factors [8-9]. On the other hand, rainfall, climate, agricultural production, and the utilization of water resources, among other factors, are perhaps the most important components of the complex hydrological cycle that affects our daily lives. Therefore, rainfall directly influences the understanding of climate change [10]. The changes observed in precipitation provide information about climate change, therefore, in studies related to detecting climate-related changes, the determination of the trend analysis of precipitation is frequently encountered [11-14]. Mann-Kendall, linear regression, variability of precipitation, and coefficient of variation methods were applied to the precipitation data of Kahramanmaraş province for trend analysis by Karabulut and Cosun, and it was stated that there is no significant increasing or decreasing trend in annual precipitation in terms of statistics [15]. Dalkılıç (2019) conducted a trend analysis on 31 years (1978-2018) of precipitation data from meteorological stations placed in the city centers of Erzincan, Gümüşhane, and Bayburt. The analysis utilized the Şen trend test, Spearman Rho, Mann-Kendall, and Seasonal Mann-Kendall tests. The study identified an increasing trend in certain months during the winter season and a decreasing trend in some months during the summer season [16]. Using monthly total precipitation data from 19 precipitation monitoring stations in the Black Sea Region of Turkey that were recorded between 1960 and 2015, trends of monthly, annual, and seasonal precipitation data were identified by Demir and the findings indicated that whereas total precipitation rises at stations in the Central and Eastern Black Sea regions, it falls at stations in the Western Black Sea region [17]. Demir also investigate that the trend analysis of water-level changes in lakes and sinkholes in Konya region at 95% of the confidence interval using meteorological parameters [18]. According to the result, the study was concluded as accurately estimating how long-term precipitation affects sinkhole and lake water levels is complicated [18]. Yağbasan et al. used in their study the Mann-Kendall, Modified Mann-Kendall, Sen Trend, and Linear Trend at confidence levels of 90%, 95%, and 99% to explore trend analysis of average monthly pan evaporation, air temperature, precipitation, humidity, wind speed, cloud cover, and sunshine duration for the lakes Eymir and Mogan which are classified as shallow lakes [19]. The findings indicated that at all confidence levels, there was an increasing trend in both lake levels for three methodologies (Mann-Kendall, Sen Trend, and Linear trend) [19].

Konya, with 12.2% of Turkey's total arable land, is categorized as a second-grade drought region in the country, experiencing considerable variation in annual precipitation throughout the different seasons [16]. Therefore, this study aimed to conduct trend analysis of relative humidity and precipitation, which will aid in formulating prospective climate scenarios, for Konya at 95% of confidence level.

MATERIALS AND METHODS

Study Area and Data

Konya, the largest province in Turkey, is located at an elevation of approximately 1,006 meters and covers an area of 41,001 km². It lies roughly between 36.70° and 39.25°N latitude and 31.25° and 34.43° E longitude. Three urban districts—Karatay, Selçuklu, and Meram—with a combined population of over 1,390,000 make up its center region (Figure 1). According to Asaad et al. (2022) [20], Konya is classified as a second-grade drought region in Turkey, and its yearly precipitation varies with the seasons.



Figure 1. Konya's districts and location in Türkiye [21].

Table 1 provides the characteristics of precipitation and relative humidity and the time series plot is shown in Figure 2.

Table 1. Statistical attributes of precipitation and relative humidity for Konya

	Min.	Max.	Mean	Std. Dev.
Precipitation (mm)	0.00	144.10	28.30	24.57
Relative humidity (%)	25.00	86.00	59.59	14.10

Trend Analysis

A trend is the gradual increase or decrease in the value of any chosen parameter over time. The tests that are both parametric and non-parametric are run to find the trend. The analysis of hydro-meteorological time series, where the data is frequently incomplete and not normally distributed, frequently makes use of non-parametric tests. Because non-parametric tests become independent of the dataset's statistical distribution, they have an advantage over parametric tests [22]. In this study, the tests applied to determine trend analysis are explained below.

Trend analysis is a tool used to identify changes over time and predict possible future trends. Therefore, trend analysis of long-term precipitation data can contribute to planning, management

and decision-making processes in various sectors. "Sen's Trend Slope," a time series analysis method, is used to determine the trend of a variable over time. This method is based on the Sen's

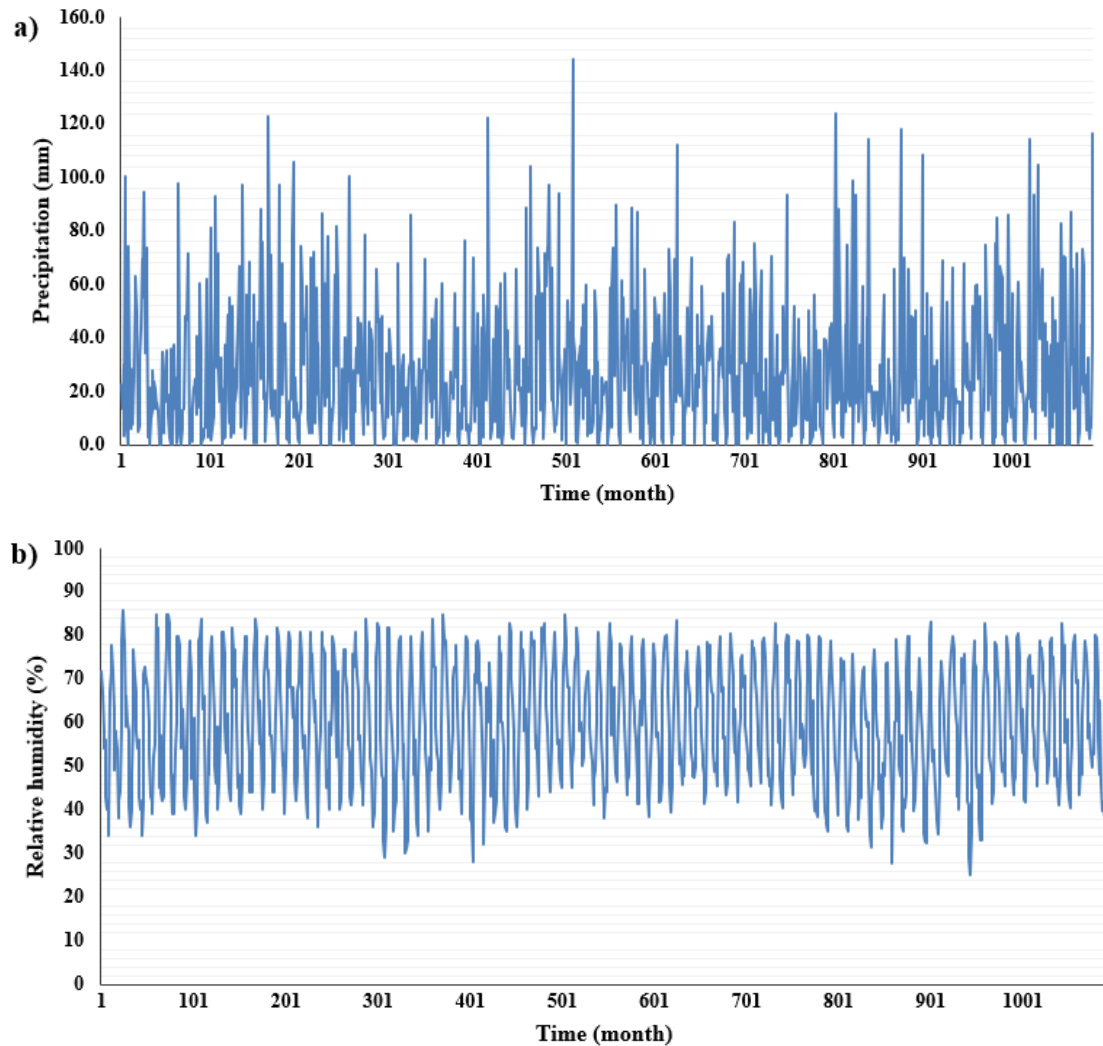


Figure 2. Time series plot of a) the monthly precipitation data and b) the relative humidity data

Tendency Test, a non-parametric test like the Mann-Kendall test. Sen's Trend Slope uses median values to determine the trend between sequential observations in the data set.

The Sen's Trend Slope method is widely used in a variety of applications, especially for determining trends in time, and in fields such as hydrology, meteorology, and environmental sciences. The long-term dataset of monthly precipitation data accumulated over 90 years is an important resource for assessing various climate trends and changes. Analyzing this data set can provide many advantages.

Mann-Kendall Test

One non-parametric test is the Mann-Kendall test. The observations x_1, \dots, x_n , which are random variables with a similar distribution and are independent of time, are arranged over time, in accordance with the null hypothesis (H_0). The alternative hypothesis (H_1) states that the distribution of values for x_k and x_j in the series is not similar for all $(k, j \leq n)$ with $k \neq j$, suggesting the existence of a linear trend in the series. Equations (1) and (2) are used to calculate the statistic for the Mann-Kendall test [23].

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

The variance of the test statistic S, is calculated (as the number of observations n_i approaches infinity, with t_i representing the duration of a specific tie in month i, the distribution of S_i becomes normal) as shown below [24].

$$\text{Var}(S) = \frac{n_i(n_i-1)(2n_i+5) - \sum t_i t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

The following equation is used to calculate the critical (z) value, which is then compared to the standard normal variable (z) [24,25].

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

The rejection of the null hypothesis H_0 occurs if the significance level α is not such that $|z| \leq z_{\alpha/2}$. An increasing trend is present if the computed value of S is positive; a decreasing trend is suggested if it is negative [25]. Hypothesis tests are used to determine whether a trend is present or not. The alternative hypothesis (H_a), which is the hypothesis where H_0 is rejected and indicates the presence of a trend, is the hypothesis where the null hypothesis (H_0) shows the absence of a trend. The rejection region, also known as the crucial region, is the area where H_0 is rejected [17] Either the one-tailed or the two-tailed (two-sided) H_a hypothesis is investigated. The probability of covering a parameter is the confidence level of its interval estimate, and it is represented by the notation "1- α ," where α is the significance level. A confidence interval is the interval for a parameter that is calculated using the confidence level. The 90%, 95%, and 99% confidence levels are the most often utilized ones [17]. The 95% confidence level was employed in this study.

Kendal' tau

Kendall proposed the concept of tau, a nonparametric rank correlation coefficient, in 1938. Tau is symbolized by the Greek letter τ . [26]. Similar to other correlation measures such as Pearson r, τ is mathematically constrained within the range of -1 to $+1$, and its numerical value signifies the level of agreement between two ordinal variables. τ serves as a rank correlation measure that shows how much two factors align a set of people or data points in a comparable order. When the $\tau_{(X,Y)}$ value is $+1.00$, it means that there is perfect agreement between the variables X and Y, meaning that every data point is ranked the same in both variables and is ordered in exactly the same way [26]. When $\tau_{(X,Y)} = -1.00$, it means that two variables have completely different orders for a given collection of data points. Under this situation, a single data point is ranked first in one variable, ranked last in another, and so on [26]. There is no association between the two variables' rank order when $\tau_{(X,Y)} = 0.00$.

Sen's Trend Slope Method

This non-parametric method can be applied when there is a linear trend for the unit change over time (actual slope). It can handle missing data and is not impacted by extreme values or data errors [25, 27]. The following formula determines the $N Q_i$ parameters at times j and k, which are sorted from smallest to largest and represented as x_j and x_k (when $j > k$) [23].

$$N = n(n - 1)/2 \quad (5)$$

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{j - k} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (6)$$

Sen's slope estimator, a useful statistic for estimating the linear trend slope parameter, is the median of these N Q_i values [23]. The following seventh equation is utilized when the number N is odd, and the following eighth equation is utilized when the number N is even to determine the unit change in the pertinent observations over time.

$$Q_{median} = Q_{(N+1)/2} \quad (7)$$

$$Q_{median} = \frac{|Q_{N/2} + Q_{(N+2)/2}|}{2} \quad (8)$$

Using Sen's non-parametric method, the obtained Q_{median} value is evaluated using a two-sided test within a $100(1-\alpha)$ % confidence interval, and the true slope is determined [25-27].

RESULTS AND DISCUSSION

The trend analysis results of Konya's average monthly total precipitation data are given in Table 2. For ordinal data, Kendall's tau is a correlation measure. It shows the average monthly total precipitation data's trend's strength and direction. A strong increasing trend is indicated by values near 1, a strong declining trend is shown by values close to -1 , and no significant trend is indicated by values close to 0. As indicated in Table 1, the values for January through December vary from -0.087 to 0.121 , with the majority of values being near 0. Because Kendall's tau values are close to zero, these values are indicating weak or no significant monotonic trend. The null hypothesis that there is no trend in the data is tested by the p-value linked to Kendall's tau. Table 1 also shows that the majority of the p-values are high (greater than 0.05), indicating that there is not enough evidence to reject the null hypothesis of no trend for each month. Fiaz Hussain et al. conducted analysis of precipitation data using methods such as Innovative Trend Pivot Analysis Method and Trend Polygon Star Concept for Soan River Basin in Pakistan [28]. The findings indicated that there were increasing and decreasing trends in different time periods [28]. The findings are supported by the comparison with the results of a similar study in the Soan River Basin, and the p-values associated with Kendall's tau confirm the lack of evidence to reject the null hypothesis of no trend for each month.

Table 2. Trend Analysis Results of Average Monthly Total Precipitation Data

Series\Test	Kendall's tau	p-value	Sen's slope
January	0,020	0,777	0,032
February	-0,087	0,220	-0,087
March	-0,030	0,671	-0,026
April	0,027	0,703	0,032
May	-0,017	0,813	-0,025
June	0,001	0,989	0,000
July	-0,047	0,534	-0,008
August	0,121	0,141	0,013
September	0,023	0,756	0,006
October	0,077	0,280	0,104
November	0,075	0,297	0,094
December	0,029	0,691	0,049

Sen's slope, which provides an indication of the trend's magnitude, is the median of all slopes between paired data points. The average monthly precipitation data has values ranging from -0.087 to

0.121, most of which show quite minor trends (Table 2) and these values suggest that if a trend exists, it is not particularly steep. Sen’s innovative and trend analysis for analysis was employed for Duzce, Zonguldak, Bartin, Kastamonu, and Sinop provinces in Turkey using data of sea surface temperatures, wind directions and wind speeds by Ceyhunlu et al. [29]. The results indicated that a rise in high wind speeds (15–25 m/s), an upward trend in medium wind directions (120°-160°), and an increase in sea surface temperature at elevated levels (15–27 °C) were noted using Sen’s Innovative Method. Conversely, a decrease in daily analyses of wind speed was observed through trend analysis methods such as Mann–Kendall and Spearman Rho [29]. This suggests that different trend analysis methods may yield contrasting results, emphasizing the importance of choosing an appropriate method for the specific characteristics of the data under investigation.

As shown in Table 3, the values range from –0.248 to –0.007, indicating a general decreasing trend in relative humidity for most months and several months have p-values less than 0.05 (January, June, December). The negative Kendall's tau values for the months of January, June, and December are linked to significant p-values (less than 0.05), suggesting a statistically significant decreasing trend in relative humidity throughout these months.

Table 3. *Trend Analysis Results of Average Relative Humidity Data*

Series\Test	Kendall's tau	p-value	Sen's slope
January	–0,170	0,029	–0,047
February	–0,145	0,062	–0,055
March	–0,086	0,271	–0,041
April	–0,007	0,929	0,000
May	–0,083	0,282	–0,029
June	–0,182	0,019	–0,076
July	–0,033	0,675	–0,006
August	0,075	0,338	0,029
September	–0,056	0,471	–0,027
October	–0,008	0,924	0,000
November	–0,111	0,149	–0,045
December	–0,248	0,001	–0,048

Sen's slope values are generally low (Table 3), suggesting a gradual or weak decreasing trend in relative humidity. Achite et al. [30] investigated the precipitation data from six stations in Algeria's Wadi Ouahrane basin, spanning the years 1972 to 2018, and analyzed for precipitation changes using the innovative trend risk analysis (ITRA), innovative trend pivot analysis (ITPAM), and trend polygon star (TPS) visualization methodologies. According to the study, the ITRA graphs indicated the direction of precipitation trends and assign a risk class to each trend. Discrepancies in polygons from ITPAM graphs revealed seasonal variations and trends in precipitation across different sites. TPS maps illustrated monthly precipitation variations, emphasizing transitions between dry and wet seasons. In the ITRA results, lower and medium precipitation regimes exhibited less trend, while imbalances are observed in high precipitation regimes. IPTAM method application indicated an overall increasing trend in precipitation [30]. According to the IPTAM approach, the study by Achite et al. [30] on precipitation data in Algeria's Wadi Ouahrane basin suggests an overall increasing trend in precipitation. It also provides insights into seasonal fluctuations, risk assessment, and precipitation trends utilizing cutting-edge analysis methodologies.

CONCLUSION

Trend analysis of precipitation and relative humidity could be an indicator of climate change,

be used to predict potential floods, droughts, or other natural disasters in certain regions, significantly affect agricultural productivity. Konya has 12.2% of Turkey's total arable land and contains population of over 1,390,000. Therefore, it is crucial to determine the trend analysis of precipitation and relative humidity for Konya.

In conclusion, the trend analysis results for the average monthly total precipitation data in Konya reveal varied patterns across different months. While some months exhibit positive trends, indicating an increasing pattern, others show negative trends, suggesting a decreasing pattern. However, it's important to note that many of these trends are not statistically significant, as evidenced by the p-values exceeding conventional significance levels.

Similarly, the trend analysis of average relative humidity data presents a mixed picture. Several months demonstrate negative trends, suggesting a decline in relative humidity, while a few months show positive trends, indicating an increase. Again, the statistical significance of these trends varies, with some being significant and others not.

Overall, the results highlight the complexity and variability in precipitation and relative humidity patterns in Konya. It is crucial to consider these findings cautiously and explore additional factors that may contribute to the observed trends. Future research and monitoring efforts should aim to provide a more comprehensive understanding of the climate dynamics in Konya, helping to inform climate resilience strategies and water resource management in the region. According to this study, scenarios and climate models that do not forecast appreciable variations in Konya's precipitation and relative humidity could be used as references when anticipating climate change.

Conflict of Interest

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship Contribution Statement

Conceptualization, K.E. and Ş.E.; Methology, K.E. and Ş.E.; Writing - Original Draft, K.E.; Writing - Review & Editing, K.E.

REFERENCES

- [1] M.C.J. Butler, A.M.García-Suárez, Relative humidity at Armagh Observatory, 1838–2008, *International Journal of Climatology*. 5(2012), 657–668. doi:10.1002/joc.2302
- [2] R.E. Davis, G.R. McGregor, K.B. Enfield, Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health, *Environmental Research*. 144(A) (2016), 106–116.
- [3] L.N. Gunawardhana, G. A. Al-Rawas, S. Kazama, An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies, *Meteorological Applications*. 24(4) (2017), 551–559.
- [4] A. Silveira, Problems of modern urban drainage in developing countries, *Water Science and Technology*. 45(7) (2002), 31–40.
- [5] M.E. Falagas, G. Theocharis, A. Spanos, L. A. Vlara, E. A. Issaris, G. Panos, G. Peppas, Effect of meteorological variables on the incidence of respiratory tract infections, *Respiratory Medicine*. 102(5) (2008), 733–737.
- [6] Ds. Zhang, X. Zhang, Yh. Ouyang, L. Zhang, Sl. Ma, J. He, Incidence of allergic rhinitis and meteorological variables: non-linear correlation and non-linear regression analysis based on Yunqi theory of Chinese medicine, *Chinese Journal of Integrative Medicine*. (2016), 1–7.
- [7] F. Özen, R. Ortaç Kabaoglu, T.V. Mumcu, Deep learning based temperature and humidity, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5 (2) (2023), 219–229.
- [8] K. Özdemir, Ö. Güngör, Filyos çayı havzasında SWAT modelinin uygulaması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1(2) (2019), 90–102.
- [9] B. Keleş, S. S. Durduran, Osmaniye ilinin arazi örtüsü ve kullanımındaki zamansal değişimin uzaktan algılama teknikleri ile araştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (1) (2019), 32–52.
- [10] R. Acar, S. Şenocak, Türkiye’deki kısa süreli yağışların trend analizi, *İklim Değişikliği ve Çevre*. 1(1) (2008), 18–25.
- [11] G. Çeribaşı, Batı karadeniz havzasının yağış verilerinin yenilikçi şen yöntemi ile analizi, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. 6(3) (2018), 168–173.
- [12] G. Çeribaşı, E. Doğan, Karadeniz ve Sakarya havzalarında yıllık ortalama yağışların trend analizi, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*. 7(1) (2015), 1–7.
- [13] M. Büyükyıldız, A. Berktaş, Parametrik olmayan testler kullanılarak Sakarya Havzası yağışlarının trend analizi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 19(2) (2004), 23–38.
- [14] S. Coşkun, Van Gölü kapalı havzasında yağışların trend analizi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 8(2) (2020), 521–532.
- [15] M. Karabulut, F. Cosun, Kahramanmaraş ilinde yağışların trend analizi, *Coğrafi Bilimler Dergisi*. 7(1) (2009), 65–83.
- [16] H.Y. Dalkılıç, Yağışların trend analizi, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 12(3) (2019), 1537–1549.
- [17] V. Demir, Karadeniz Bölgesi Yağışlarının Trend Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 2018.
- [18] V. Demir, Trend analysis of lakes and sinkholes in the Konya Closed Basin, in Turkey, *Natural Hazards*. 112 (2022), 2873–2912.
- [19] O. Yagbasan, V. Demir, H. Yazıcıgil, Trend analyses of meteorological variables and lake levels for two shallow lakes in central Turkey, *Water*. 12 (2020), 414. doi:10.3390/w12020414
- [20] M.N. Asaad, Ş. Eryürük, K. Eryürük, Forecasting of streamflow and comparison of artificial intelligence methods: a case study for Meram stream in Konya, Turkey, *Sustainability*. 14(10) (2022), 6319. <https://doi.org/10.3390/su14106319>

- [21] C. Karaca, The Biogas potential of animal manure and its ghg reduction effect in Konya Province, Turkey, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(4) (2023), 232–239.
- [22] C.B. Karakuş, Hidro-meteorolojik parametreler için trend analizi yöntemleri, *International Journal of Scientific and Technological Research*. 3(2) (2017), 22–32.
- [23] Ö. Terzi, A. İlker, Yağış Verilerinin Trend Analizi: Kızılırmak Havzası Örneği, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*. 9(2) (2021), 371–377.
- [24] R.M. Hirsch, J.R. Slack, R.A. Smith, Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*. 18(1) (1982), 107–121.
- [25] S. Kalaycı, E. Kahya, Susurluk Havzası nehirlerinde su kalitesi trendlerinin belirlenmesi, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*. 22(6) (1998), 503–514.
- [26] D.F. Brossart, V.C. Laird, T.W. Armstrong, Interpreting Kendall's Tau and Tau-U for single-case experimental designs, *Cogent Psychology*. 5(1) (2018). doi: 10.1080/23311908.2018.1518687
- [27] Y. S. Yu, S. Zou, D. Whittemore, Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas, *Journal of Hydrology*. 150(1) (1993), 61–80.
- [28] F. Hussain, G. Ceribasi, A.I. Ceyhunlu, R.-S. Wu, M.J.M. Cheema, R.S. Noor, MUHAMMAD N. Anjum, M. Azam, A. Afzal, Analysis of precipitation data using innovative trend pivot analysis method and trend polygon star concept: a case study of soan river basin, Potohar Pakistan, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. (2022), 1861–1880.
- [29] A.I. Ceyhunlu, G. Ceribasi, N. Ahmed, H. Al-Najjar, Climate change analysis by using sen's innovative and trend analysis, *Journal of Coastal Conservation*. (2021), 25-50.
- [30] M. Achite, G. Ceribasi, A. Wałęga, A.I. Ceyhunlu, N. Elshaboury, N. Krakauer, T. Hartani, T. Caloiero, S. Gul, Analysis of monthly average precipitation of Wadi Ouahrane basin in Algeria by using the ITRA, ITPAM, and TPS methods, *Environmental Monitoring and Assessment*. 195 (2023), 606.

ROC Analizinde Doğruluk Oranına Dayalı Uyarlanmış Kesme Değerleri ve Performans Karşılaştırmaları

Ahmet PEKGÖR¹  Aydın KARAKOCA¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 15.12.2023

Kabul Tarihi: 28.01.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Keywords:

Doğruluk oranı,
Kesme değer,
ROC analizi.

ÖZET

Karar vericiler için özellikle iki kategorili (pozitif/negatif) sınıflandırma problemlerinde alternatif testler arasından hangisinin kullanılacağı belirlenmesi önemli bir problemdir. Tıpta hastalık tanısı konulması amacıyla kullanılan tanı testleri başta olmak üzere bir sınıflandırıcının iki seçenek arasındaki seçim performansının değerlendirilmesi araştırmacılar için önemli bir sorundur. ROC (Receiver Operating Characteristic) analizi bu testlerin performanslarını detaylı biçimde haritalayabilen ve karar vermede önemli olan kesme değerinin bulunmasına yarayan bir istatistiksel yöntemdir. Literatürde mevcut kesme değeri hesabı duyarlılık ve özgüllük değerlerini kullanmaktadır. Duyarlılık ve özgüllük değerleri kadar doğruluk oranı da kesme değeri hesaplanmasında dikkate alınması gereken bir diğer ölçüttür. Bu çalışmada doğruluk oranı baz alınarak alternatif kesme değerlerinin hesaplanması üzerinde duruldu. Literatürde mevcut olan Youden indeksi, köşe uzaklığı indeksi, uyum olasılığı indeksi ve birlik indeksi yöntemleri doğruluk oranı ile uyarlanarak yeni yöntemler önerildi. Pozitif ve negatif olguların simetrik dağılıma sahip olduğu durumlar için eşit ağırlıklı olarak mevcut ve uyarlanmış indeksler karşılaştırılmıştır. Toplam 8 ayrı kesme değerinin performansları R programında Monte-Carlo simülasyonu ile 20000 deneme üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen uyarlanmış yöntemlerin en az mevcut olan yöntemler kadar doğruluk oranına sahip olduğu gösterilmiştir.

Adapted Cut-Off Values and Performance Comparisons Based on Accuracy Rate in ROC Analysis

Article Info

Article History

Received: 15.12.2023

Accepted: 28.01.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Accuracy rate,
Cut-off value,
ROC analysis.

ABSTRACT

Decision-makers face a major challenge in determining which of the alternative tests to use, especially in binary (positive/negative) classification problems. The performance of a classifier in selecting between two options, including diagnostic tests used to diagnose a disease in medicine, is an important research problem. ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis is a statistical method that can map the performance of these tests in detail and identify the optimal cut-off value for decision making. Current cut-off value calculations employed in literature use sensitivity and specificity values. Accuracy is also another measure that should be considered in the calculation of the cut-off value, as well as sensitivity and specificity values. In this study, we focused on the calculation of alternative cut-off values based on accuracy. The existing Youden index, corner distance index, compatibility probability index, and unity index methods were adapted with accuracy and new methods were proposed. In cases where positive and negative cases have a symmetric distribution, the existing and adapted indices were compared with equal weights. The performance of a total of 8 different cut-off values was evaluated over 20,000 trials using Monte-Carlo simulation in the R program. According to the simulation results, the proposed adapted methods were shown to have at least the same accuracy as the existing methods.

To cite this article: Pekgör, A. & Karakoca, A. (2024). ROC analizinde doğruluk oranına dayalı uyarlanmış kesme değerleri ve performans karşılaştırmaları, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 115-123. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.36>

*Sorumlu Yazar: Ahmet Pekgör, apekgor@erbakan.edu.tr



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

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karar verme ihtiyacı günlük yaşantının vazgeçilmez bir parçasıdır. Karar vermede iki alternatif arasında kalmak günlük yaşantıda sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Örneğin bir doktor tahlil sonuçlarına bakarak hastanın kanser olup olmadığına ya da ameliyat edilemeyeceğine, askeri operasyonlarda radara giren bir objenin tehdit oluşturup oluşturmadığına, bir bilgisayar uygulamasının virüs içerip içermediğine veya veri setinde aykırı (anomali, outlier) değerlerin olup olmadığına karar vermek durumunda kalınabilir.

İki alternatif arasında karar verirken alıcı işletim karakteristiği literatürde yaygın bilinen adıyla Receiver Operating Characteristic (ROC) analizi istatistiksel olarak bir karar verme amacıyla ve sınıflama çalışmalarının performanslarının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. ROC analizi günümüzde tıptan biyometriye, meteorolojik olaylardan doğal afetlere, makine öğreniminden model performanslarının karşılaştırılmasına kadar pek çok farklı kullanım alanına sahiptir. ROC analizi sinyal algılama teorisi ile ilgili temel çalışmalardan biridir ve bu alandaki gelişmelere odaklanarak ilk olarak askeri radar operasyonlarındaki gözlemcilerin performansını değerlendirmek için kullanıldı [1]. Daha sonraki dönemlerde bu analiz uygulamalarda daha çok ikili sınıflandırıcı değişkenin ayırt etme sınırı değiştikçe tanılama yeteneğini görselleştiren bir grafiksel yöntem olarak kullanıldı [2]. Bu görsellik içerisinde ROC eğrisinin altındaki alanı ölçen Area Under Curve (AUC) değeri, tüm olası sınıflandırma sınırlarında toplu bir performans ölçüsü de sağlar [3].

ROC analizi tanı testlerinin değerlendirmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Tanı testinin yorumlanabilmesi için testin üzerinde uyguladığı olguların, gerçek tanı sonuçlarının bilinmesi gerekmektedir. Sağlık alanında bir hastalık tanısını belirlemede “gold-standard” yöntem olarak isimlendirilen doğru sonuçlar verdiği literatürde herkes tarafından kabul edilen bir yöntem referans olarak kullanılır. Bu yöntemde sonuçlar klinik süreç, cerrahi doğrulama, otopsi ve bazı olgularda bir uzmanın danışmanlığı ile elde edilir [4]. Tanı testlerinde tanının konulabilmesi için bir kesme değerinin hesaplanması önem arz etmektedir. Bu kesme değeri literatürde özellikle tıp alanında ROC analizi ile tanı testi çalışmalarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [5-10]. Tanı testlerinde kesme değeri pozitif olgu ile negatif olgunun ayırt edilmesinde kullanılmıştır. Bu kesme değeri hesaplamaları ROC analizinin ilk zamanlarına dayanır [11]. Literatürde en iyi kesme değeri hesaplama ve bu yöntemlerin karşılaştırmalarıyla ilgili çalışmalar güncelliğini korumaktadır.

Bu çalışmada ROC analizinde kesme değerinin hesaplanmasında önemli bir yere sahip olan pozitif olgular içerisindeki doğruluk oranı ile negatif olgulardaki doğruluk oranları dikkate alınmıştır. Bu nedenle literatürde yaygın olarak kullanılan duyarlılık ve özgüllük değerleriyle hesaplanan kesme değerleri, doğruluk değerlerini içerecek şekilde yeniden uyarlanarak dört yeni kesme değeri önerilmiştir. Mevcut ve yeni değerlerin performans karşılaştırmaları farklı durumlar için detaylı bir simülasyon çalışmasıyla incelenmiştir.

MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bir tanı testinde oluşabilecek tüm olası haller karışıklık matrisi (confusion matrix) ile belirlenir. Karışıklık matrisi bir tanı testinde doğru pozitif, doğru negatif, yanlış pozitif ve yanlış negatif olası şekilde dört farklı durumu içerir. Tablo 1’de verilen ve tanı testlerinde yaygın olarak kullanılan tanımlar;

Doğru Pozitif (True Positive)

Gerçekte var olan olgularda, test sonucunda da varlığı görülen durumlar

Doğru Negatif (True Negative)

Gerçekte var olmayan olgularda, test sonucunda varlığı görülmeyen durumlar

Yanlış Pozitif (False Positive)

Gerçekte var olmayan olgularda, test sonucunda varlığı görülen durumlar

Yanlış negatif (false negative)

Gerçekte var olan olgularda, test sonucunda varlığı görülmeyen durumlar ile ifade edilebilir.

Tablo 1. Bir tanı testinde oluşabilecek durumlar, karışıklık matrisi (Situations that may occur in a diagnostic test, confusion matrix)

Test Sonucu	Gerçek Durum (Olgu)		Toplam
	Pozitif	Negatif	
Pozitif	Doğru Pozitif (<i>a</i>)	Yanlış Pozitif (<i>b</i>)	<i>a + b</i>
Negatif	Yanlış Negatif (<i>c</i>)	Doğru Negatif (<i>d</i>)	<i>c + d</i>
Toplam	<i>a + c</i>	<i>b + d</i>	<i>a + b + c + d</i>

Duyarlılık (Sensitivity)

Testin, gerçekte pozitif olan olguları doğru tespit edebilme oranıdır.

$$\text{Duyarlılık} = a / (a + c)$$

Özgüllük (Specificity)

Testin, gerçekte negatif olan olguları doğru tespit edebilme oranıdır.

$$\text{Özgüllük} = d / (b + d)$$

Doğruluk (Accuracy)

Doğru negatif ile doğru pozitif değerlerinin toplam oranıdır.

$$\text{Doğruluk} = (a + d) / (a + b + c + d)$$

Eğri Altındaki Alan (AUC)

ROC eğrisi grafiğindeki eğri altındaki tüm alanın ölçüsüdür. AUC, kesme değerlerine karşılık olası tüm sınıflandırmalardaki performans ölçüsünü gösterir. Bu nedenle mevcut iki tanı testi arasında AUC ölçüsü daha büyük olanın diğerine kıyasla daha yüksek ayırtıcılığa sahip olduğu belirlenir. Bir değişkenin etkin bir ayırt ediciliğinden bahsedebilmek için o değişkene ait AUC güven aralığı içerisinde 0,5'in yer almaması gerekir. ROC eğrisi grafiği, değişkenlerin değişim aralığındaki tüm ara değerlerine göre sırasıyla karışıklık matrisleri bulunarak, Duyarlılık değerlerine karşılık 1-Özgüllük değerlerinin noktalanması ile oluşturulur.

Kesme Değeri Hesaplama Yöntemleri (Cut-off Value Calculation Methods)

Kesme (sınır, eşik, cut-off, threshold) değeri, tanı için pozitif olgu ile negatif olguyu ayırıştırıcı olan değerdir. Tanı testinin kesme değerinin hesaplanmasında pozitif olgular içerisindeki doğruluk oranı ile negatif olgulardaki doğruluk oranları önem arz etmektedir. Bu nedenle literatürde yaygın olarak Duyarlılık ve Özgüllük değerlerine ilişkin kesme değeri hesaplama yöntemleri bulunmaktadır. Literatürde kullanılan bazı kesme değeri hesaplama yöntemleri:

Youden İndeksi (Youden Index)

Youden indeksi, ROC eğrisi üzerindeki noktaların ters köşegene olan uzaklıklarıdır.

$$Y = \text{Duyarlılık} + \text{Özgüllük} - 1$$

Bu uzaklıklar içerisindeki en büyük değer kesme değeri olarak kabul edilebilir [11]. Hesaplama

pratikliğinden ve sonuçların tutarlılığından dolayı literatürde en yaygın kullanılan kesme değeri yöntemidir.

Köşe Uzaklığı İndeksi (Corner Distance Index)

ROC eğrisinde (0,1) noktasına yani grafiğin sol üst köşesine olan mesafedir. Bu mesafe,

$$KU = \sqrt{(1 - Duyarlilik)^2 + (1 - Özgüllük)^2}$$

biçiminde hesaplanır. Kesme değeri bu mesafeyi en küçükleyen değer olarak belirlenir [12].

Uyum Olasılığı İndeksi (Probability of Fit Index)

Uyum olasılığı indeksi Liu (2012) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde göre kesme değeri Duyarlilik ile Özgüllük değerlerinin çarpımını en büyükleyen değer olarak belirlenir [13].

$$UO = Duyarlilik \times Özgüllük$$

Birlik İndeksi (Index of Union)

Duyarlilik ve Özgüllük değerlerinin aynı anda hem AUC değerine yakın olması hem de bu iki değer birbirine yakın olması düşüncesi ile kesme değeri,

$$B = |Duyarlilik - AUC| + |Özgüllük - AUC|$$

bu uzaklığı en küçükleyen değer olarak belirlenir [14].

Uyarlanmış Yeni Yöntemler (Adapted New Methods)

Uygulamalarda ROC analizi sonrasında Duyarlilik ve Özgüllük kadar Doğruluk değerinin de 1'e yakın olması arzulanan bir durumdur. Bu açıdan Doğruluk değerinin de kesme değerinin hesaplanmasına katkı sağlayabileceği paralel bir düşüncedir. Sırasıyla Y, KU, UO ve B indeksi yöntemlerinin Doğruluk ile uyarlanmış halleri,

$$Y_M = Duyarlilik + Özgüllük + Doğruluk$$

$$KU_M = \sqrt{(1 - Duyarlilik)^2 + (1 - Özgüllük)^2 + (1 - Doğruluk)^2}$$

$$UO_M = Duyarlilik \times Özgüllük \times Doğruluk$$

$$B_M = |Duyarlilik - AUC| + |Özgüllük - AUC| + |Doğruluk - AUC|$$

eşitlikleri ile tanımlanmıştır.

Uygulama ve Performans Değerlendirmesi (Application and Performance Evaluation)

Uygulamada mevcut ve uyarlanmış halleri ile toplamda 8 ayrı yöntem ile kesme değerlerinin performansları R programında Monte-Carlo simülasyonu ile 20000 deneme üzerinden değerlendirilmiştir. Örneklem hacimleri sırasıyla n=10, n=20, n=50 ve n=100 alınmıştır. Simülasyon çalışmasında gerçekte negatif olgular $\sim N(\mu_1, \sigma_1)$, pozitif olgular ise $\sim N(\mu_2, \sigma_2)$ dağılımlı kitleden eşit ağırlıklı olacak şekilde kurgulanmıştır. Bu dağılımlardaki parametrelerden (μ_1, μ_2) ortalama değerleri sırasıyla (20, 21), (20, 22), (20, 23) ve (σ_1, σ_2) standart sapma değerleri de sırasıyla (1, 1), (1, 2) ve (1, 3) alınmıştır. Her bir simülasyonda yöntemlere ait kesme değerlerine bağlı doğruluk oranları hesaplanarak performans karşılaştırmaları doğruluk oranları kriterine göre incelenmiştir.

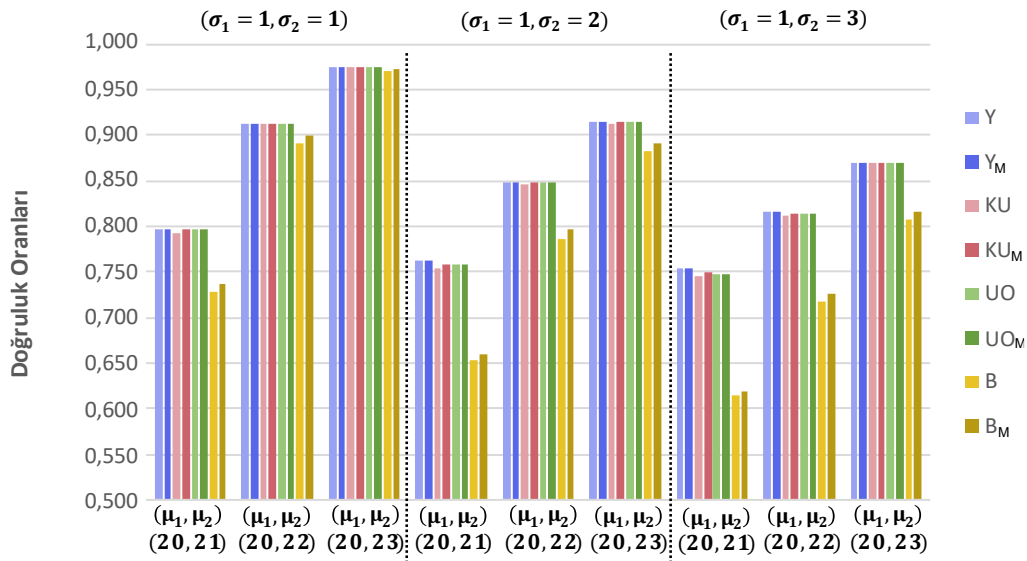
BULGULAR (RESULTS)

Mevcut yöntemler ve uyarlanmış yeni yöntemlerin karşılaştırıldığı simülasyon çalışmasından

elde edilen doğruluk oranı değerleri Tablo 2-5'te, ilgili grafikler de Şekil 1-4'te verilmiştir.

Tablo 2. Örneklem hacmi 10 için simülasyonlarda doğruluk oranları (Accuracy rates in simulations for sample size 10)

(μ_1, μ_2)	(σ_1, σ_2)	Y	Y _M	KU	KU _M	UO	UO _M	B	B _M
(20, 21)	(1, 1)	0,79724	0,79724	0,79225	0,79590	0,79580	0,79580	0,72710	0,73704
	(1, 2)	0,76144	0,76144	0,75344	0,75835	0,75799	0,75799	0,65308	0,66028
	(1, 3)	0,75326	0,75326	0,74457	0,74946	0,74839	0,74839	0,61356	0,61903
(20, 22)	(1, 1)	0,91300	0,91300	0,91248	0,91297	0,91297	0,91297	0,89109	0,89872
	(1, 2)	0,84795	0,84795	0,84522	0,84752	0,84750	0,84750	0,78695	0,79642
	(1, 3)	0,81552	0,81552	0,81083	0,81440	0,81430	0,81430	0,71808	0,72576
(20, 23)	(1, 1)	0,97460	0,97460	0,97460	0,97460	0,97460	0,97460	0,97104	0,97330
	(1, 2)	0,91380	0,91380	0,91331	0,91376	0,91376	0,91376	0,88327	0,89106
	(1, 3)	0,87048	0,87048	0,86855	0,87022	0,87022	0,87022	0,80683	0,81547

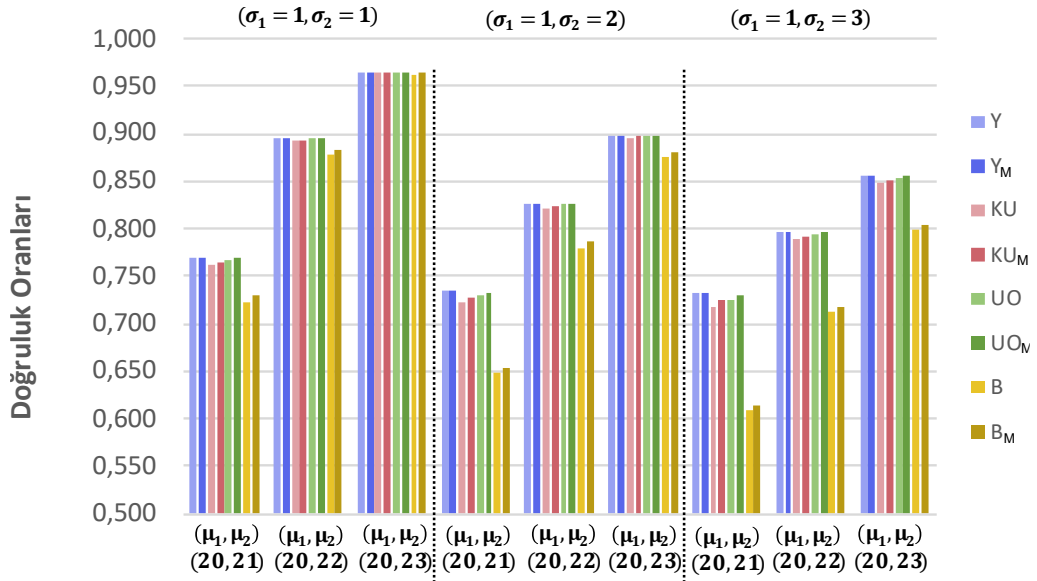


Şekil 1. Örneklem hacmi 10 için simülasyonlarda doğruluk oranlarının grafiği (Graph of accuracy rates in simulations for sample size 10)

Tablo 2 ve Şekil 1 incelendiğinde örnek hacmi (n=10) durumunda Y_M ve UO_M indekslerinin Y ve UO indeksleriyle aynı doğruluk oranına sahip olduğu, KU_M ve B_M indekslerinin ise KU ve B indekslerinden daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu bulunmuştur.

Tablo 3. Örneklem hacmi 20 için simülasyonlarda doğruluk oranları (Accuracy rates in simulations for sample size 20)

(μ_1, μ_2)	(σ_1, σ_2)	Y	Y _M	KU	KU _M	UO	UO _M	B	B _M
(20, 21)	(1, 1)	0,76971	0,76971	0,76264	0,76556	0,76796	0,76910	0,72370	0,72900
	(1, 2)	0,73579	0,73579	0,72350	0,72870	0,73057	0,73379	0,64930	0,65378
	(1, 3)	0,73248	0,73248	0,71777	0,72422	0,72569	0,73000	0,61006	0,61408
(20, 22)	(1, 1)	0,89440	0,89440	0,89229	0,89375	0,89437	0,89440	0,87901	0,88421
	(1, 2)	0,82681	0,82681	0,82081	0,82338	0,82603	0,82663	0,78001	0,78609
	(1, 3)	0,79695	0,79695	0,78816	0,79158	0,79492	0,79648	0,71322	0,71871
(20, 23)	(1, 1)	0,96521	0,96521	0,96506	0,96520	0,96521	0,96521	0,96271	0,96420
	(1, 2)	0,89863	0,89863	0,89627	0,89777	0,89859	0,89863	0,87495	0,87998
	(1, 3)	0,85489	0,85489	0,84981	0,85219	0,85449	0,85484	0,79964	0,80533

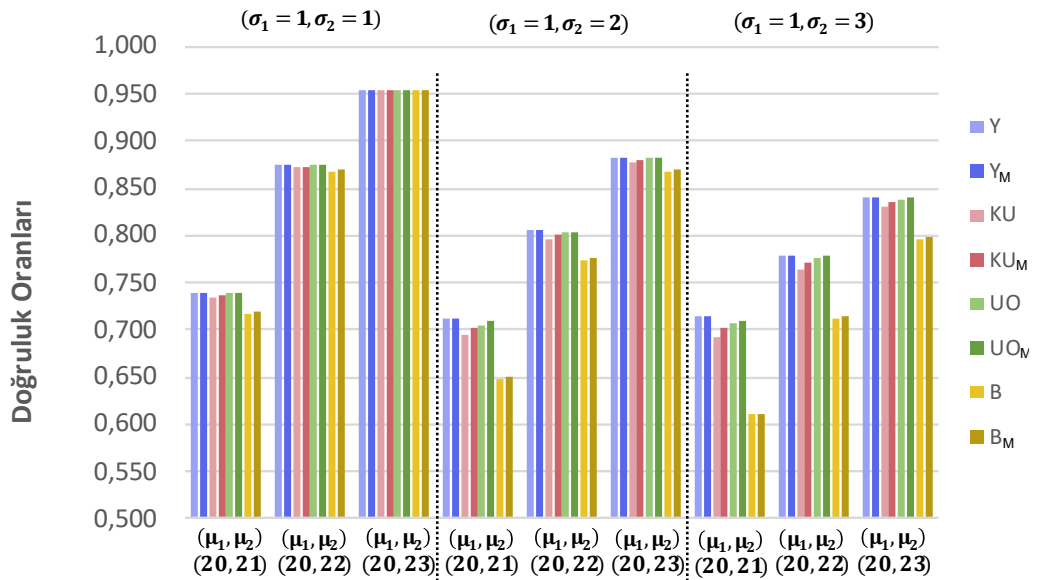


Şekil 2. Örneklem hacmi 20 için simülasyonlarda doğruluk oranlarının grafiği (Graph of accuracy rates in simulations for sample size 20)

Tablo 3 ve Şekil 2 incelendiğinde örnek hacmi ($n=20$) olması durumunda Y_M ve Y indekslerinin aynı doğruluk oranına sahip olduğu, KU_M , UO_M ve B_M indekslerinin doğruluk değerlerinin ise sırasıyla KU , UO ve B indekslerinden daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu bulunmuştur.

Tablo 4. Örneklem hacmi 50 için simülasyonlarda doğruluk oranları (Accuracy rates in simulations for sample size 50)

(μ_1, μ_2)	(σ_1, σ_2)	Y	Y_M	KU	KU_M	UO	UO_M	B	B_M
(20, 21)	(1, 1)	0,73958	0,73958	0,73355	0,73605	0,73781	0,73874	0,71626	0,71831
	(1, 2)	0,71145	0,71145	0,69569	0,70189	0,70532	0,70843	0,64822	0,65046
	(1, 3)	0,71360	0,71360	0,69182	0,70131	0,70605	0,71026	0,60946	0,61111
(20, 22)	(1, 1)	0,87406	0,87406	0,87135	0,87260	0,87401	0,87405	0,86767	0,86906
	(1, 2)	0,80454	0,80454	0,79618	0,79974	0,80341	0,80415	0,77281	0,77521
	(1, 3)	0,77921	0,77921	0,76488	0,77141	0,77690	0,77834	0,71087	0,71340
(20, 23)	(1, 1)	0,95490	0,95490	0,95412	0,95460	0,95490	0,95490	0,95323	0,95419
	(1, 2)	0,88198	0,88198	0,87792	0,87965	0,88190	0,88197	0,86684	0,86896
	(1, 3)	0,83946	0,83946	0,83077	0,83464	0,83892	0,83929	0,79610	0,79892

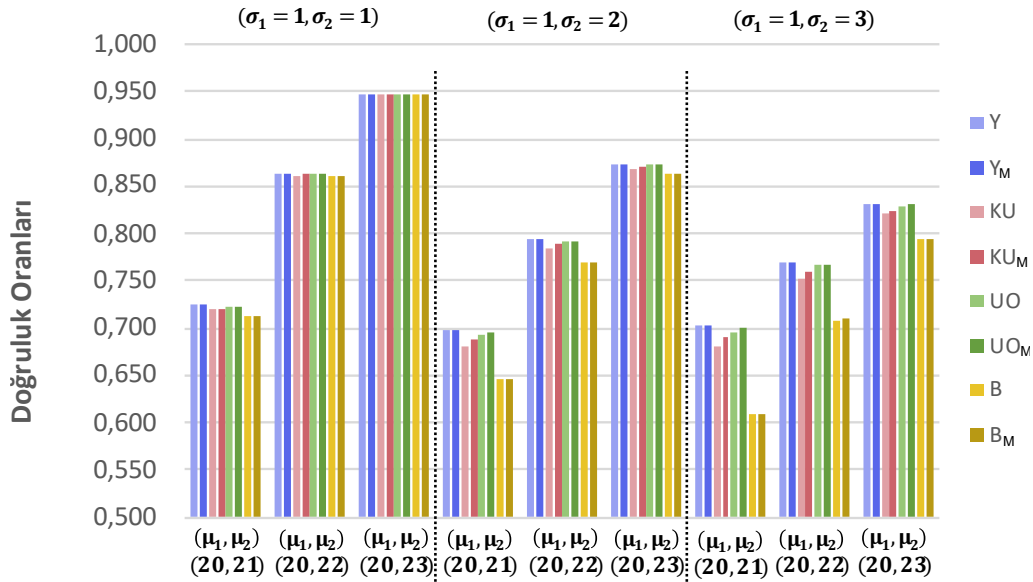


Şekil 3. Örneklem hacmi 50 için simülasyonlarda doğruluk oranlarının grafiği (Graph of accuracy rates in simulations for sample size 50)

Tablo 4 ve Şekil 3 incelendiğinde örnek hacmi ($n=50$) olması durumunda Y_M ve Y indekslerinin aynı doğruluk oranına sahip olduğu, KU_M , UO_M ve B_M indekslerinin doğruluk değerlerinin ise sırasıyla KU , UO ve B indekslerinden daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu bulunmuştur.

Tablo 5. Örneklem hacmi 100 için simülasyonlarda doğruluk oranları (Accuracy rates in simulations for sample size 100)

(μ_1, μ_2)	(σ_1, σ_2)	Y	Y_M	KU	KU_M	UO	UO_M	B	B_M
(20, 21)	(1, 1)	0,72407	0,72407	0,71951	0,72125	0,72258	0,72331	0,71162	0,71244
	(1, 2)	0,69867	0,69867	0,68194	0,68816	0,69191	0,69506	0,64590	0,64708
	(1, 3)	0,70370	0,70370	0,67977	0,68994	0,69566	0,69988	0,60909	0,61027
(20, 22)	(1, 1)	0,86380	0,86380	0,86158	0,86257	0,86372	0,86377	0,86125	0,86165
	(1, 2)	0,79344	0,79344	0,78480	0,78814	0,79206	0,79286	0,76908	0,77021
	(1, 3)	0,76944	0,76944	0,75335	0,76027	0,76671	0,76823	0,70863	0,71016
(20, 23)	(1, 1)	0,94820	0,94820	0,94725	0,94770	0,94820	0,94820	0,94745	0,94779
	(1, 2)	0,87307	0,87307	0,86835	0,87039	0,87294	0,87305	0,86273	0,86367
	(1, 3)	0,83071	0,83071	0,82035	0,82476	0,82992	0,83046	0,79385	0,79534



Şekil 4. Örneklem hacmi 100 için simülasyonlarda doğruluk oranlarının grafiği (Graph of accuracy rates in simulations for sample size 100)

Tablo 5 ve Şekil 4 incelendiğinde örnek hacmi ($n=50$) olması durumunda Y_M ve Y indekslerinin aynı doğruluk oranına sahip olduğu KU_M , UO_M ve B_M indekslerinin doğruluk değerlerinin ise sırasıyla KU , UO ve B indekslerinden daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu bulunmuştur.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

ROC analizinde mevcut ve yeni önerilen uyarlanmış kesme değerlerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada, Monte-Carlo simülasyon sonuçları Tablo 2-5'te yer almaktadır. Bu sonuçlarda pozitif olgu ile negatif olguların geldikleri dağılımın kitle ortalama değerleri arasındaki fark arttıkça doğruluk oranlarının arttığı, pozitif olgulara ilişkin kitle varyansının artması durumunda ise doğruluk oranlarının azaldığı görülmüştür. Küçük örneklem hacimlerinde doğruluk oranları beklenilenden yüksek çıkmıştır. Genel olarak tüm durumlarda doğruluk oranına göre Youden indeks değeri en yüksek, Birlik indeks değeri de en düşük performansı sergilemişlerdir.

Youden indeksi haricinde diğer tüm yöntemler için önerilen uyarlanmış kesme değer yaklaşımının daha iyi doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür. Youden indeksi ile uyarlanmış yeni yöntem aynı doğruluk oran değerlerine sahiptir. Uyum Oranı indeksinde örneklem hacmi 10 iken

uyarlanmış yöntem mevcut olan yöntemle aynı sonucu vermiştir. Bu sonuçlara göre önerilen yöntemlerin uygulamalarda kullanılması doğruluk oranını iyileştireceği söylenebilir.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

A.P.: Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Yazılım (Software), Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Malzemeler (Resources), Veri Toplama ve/veya İşleme (Data Curation), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Literatür Taraması (Investigation) Yazı Yazan (Writing - Original Draft), **A.K.:** Tasarım ve Dizayn (Methodology), Malzemeler (Resources), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Yazı Yazan (Writing - Original Draft), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] D. M. Green, J. A. Swets, Signal detection theory and psychophysics, Wiley, New York, 1966.
- [2] C. E. Metz, Basic principles of ROC analysis. *In Seminars in Nuclear Medicine.* 8(4) (1978) 283-298. doi: 10.1016/s0001-2998(78)80014-2
- [3] J. A. Hanley, B. J. McNeil, The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve, *Radiology.* 143(1) (1982) 29-36. doi: 10.1148/radiology.143.1.7063747
- [4] M. Greiner, D. Pfeiffer, R. D. Smith, Principles and practical application of the receiver-operating characteristic analysis for diagnostic tests, *Preventive Veterinary Medicine.* 45(1-2) (2000) 23-41. doi: 10.1016/s0167-5877(00)00115-x
- [5] S. Demircioğlu, S. Budancamanak, A. Doğan, Serum B12 düzeyi primer ve sekonder polisitemi ayırıcı tanısında etkin bir ayırıcı tanı kriteri olarak kullanılabilir mi?. *Selçuk Tıp Dergisi.* 36(1), (2020) 22-26. doi: 10.30733/std.2020.01365
- [6] Y. E. Göğer, M.S. Özkent, S. İyisoy, G. Karalezli, M. Kılınç, Psa değeri 4-10 arasında olan hastalarda prostat kanserini öngörmeye serbest Psa/psad,(serbest/total Psa)/psad'nin tanısal değeri; tek merkezli çalışma sonuçları, *Selçuk Tıp Dergisi.* 37(2) (2021) 106-112. doi: 10.30733/std.2021.01506
- [7] R. Alanlı, M. B. Küçükay, K. S. Yalçın, Alkole bağlı olmayan karaciğer yağlanması ile yüksek dansiteli dışı lipoprotein/yüksek dansiteli lipoprotein oranının ilişkisi, *Selçuk Tıp Dergisi.* 37(3) (2021) 251-256. doi: 10.30733/std.2021.01518
- [8] Z. D. Dündar, K. Küçükceran, M. K. Ayrancı, Kritik bakım hastalarında kan üre azotu/albumin oranının hastane içi mortaliteyi tahmin gücünün değerlendirilmesi, *Selçuk Tıp Dergisi.* 37(4) (2021) 294-300. doi: 10.30733/std.2021.01508
- [9] A. F. Kekeç, A. Kırılmaz, H. Yaka, T. S. Çolak, H. S. Semis, Kalça kırıkları sonrası cerrahi zamanlamanın ve Covid-19 pandemisinin mortaliteye etkisi, *Selçuk Tıp Dergisi.* 38(3) (2022) 136-142. doi: 10.30733/std.2022.01560
- [10] A. Yücel, A. O. Kılıç, S. B. Kılınç, Pediatrik akut pankreatit şiddetinin erken tahmininde inflamatuvar biyobelirteçlerin rolü, *Selçuk Tıp Dergisi.* 38(4) (2022) 186-193. doi: 10.30733/std.2022.01567
- [11] W. J. Youden, Index for rating diagnostic tests, *Cancer.* 3(1) (1950) 32-35. doi:10.1002/1097-0142(1950)3:1%3C32::AID-CNCR2820030106%3E3.0.CO;2-3
- [12] N. J. Perkins, E. F. Schisterman, The inconsistency of “optimal” cutpoints obtained using two criteria based on the receiver operating characteristic curve, *American Journal of Epidemiology.* 163(7) (2006) 670-675. doi: 10.1093/aje/kwj063
- [13] X. Liu, Classification accuracy and cut point selection, *Statistics in Medicine.* 31(23) (2012) 2676-2686. doi: 10.1002/sim.4509
- [14] I. Ünal, Defining an optimal cut-point value in ROC analysis: an alternative approach, *Computational and mathematical methods in medicine.* (2017). doi: 10.1155/2017/3762651

Yumurtalı ve Yumurtasız Formüle Edilen Madımak (*Polygonum cognatum*) Tozu İlaveli Eriştelerin Fonksiyonel İçeriği ve Duyusal Özellikleri

Tekmile CANKURTARAN KÖMÜRCÜ¹  Nermin BİLGİÇLİ¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi	ÖZET
Makale Geçmişi Geliş Tarihi: 12.12.2023 Kabul Tarihi: 30.01.2024 Yayın Tarihi: 30.04.2024 Keywords: Antioksidan, Erişte, Fonksiyonel gıda, Madımak, Yumurta.	Bu çalışmada, Türkiye'nin endemik bitkilerinden biri olan madımak (<i>Polygonum cognatum</i>) kurutulmuş toz haline getirilmiş ve farklı oranlarda (%0, 5, 10, 15, 20) erişte formülasyonunda kullanılmıştır. Erişte üretimi yumurtalı ve yumurtasız olarak gerçekleştirilmiştir. Madımak tozu ve yumurta ilavesinin eriştelerin renk, teknolojik, fonksiyonel ve duyusal özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Yumurta kullanımı erişte örneklerinin renk değerini (L* ve b*), pişme özelliklerini, antioksidan aktivite ve fenolik madde içeriklerini önemli derecede etkilemiştir. Yumurta ilavesi ayrıca erişte örneklerinin pişirme sırasında suya geçen madde miktarını azaltarak erişteleri teknolojik olarak geliştirmiştir. Madımak tozunun %20 oranında ilavesi ile örneklerin ortalama ağırlık ve hacim artışı değerleri yaklaşık olarak %24,78 ve %56,88 oranında artış göstermiştir. Madımak tozunun artan oranı, eriştelerin analiz edilen biyoaktif içeriğini önemli ölçüde artırmış, bu artış yumurta ilaveli örneklerde daha fazla oranda gerçekleşmiştir. Duyusal analiz sonuçları, %5 ve 10 madımak tozu ilaveli örneklerin genel olarak duyusal özelliklerinin kontrol erişte örneğine benzer olduğunu, %10'un üzerinde kullanımının ise duyusal özellikleri olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, çiğ erişte formülasyonunda yumurta kullanımının özellikle renk, görünüş ve kırılabilirlik özellikleri, pişmiş erişte örneklerinde ise tüm özellikleri olumlu etkilediği belirlenmiştir.

Functional Content and Sensory Properties of Madımak (*Polygonum cognatum*) Powder Added Noodles Formulated with and without Eggs

Article Info	ABSTRACT
Article History Received: 12.12.2023 Accepted: 30.01.2024 Published: 30.04.2024 Keywords: Antioxidant, Egg, Functional food, Knotweed, Noodle.	In this study, madımak (<i>Polygonum cognatum</i>), one of Turkey's endemic plants, was dried and used in noodle formulation as powder form at different rates (0, 5, 10, 15, 20%). Noodle production was carried out with and without egg. The effects of madımak powder and egg addition on the color, technological, functional and sensory properties of noodles were investigated. The use of egg significantly affected the color value (L* and b*), cooking properties, antioxidant and phenolic contents of noodle samples. Egg addition technologically improved noodles by reducing cooking loss during cooking. With the addition of 20% madımak powder, the weight and volume increase values of the samples increased by 24.78% and 56.87%, respectively. The increasing proportion of madımak powder significantly increased the analyzed bioactive content of the noodles, and this increase occurred at a higher rate in the egg-added samples. Sensory analysis results showed that the sensory properties of the samples with 5 and 10% madımak powder were generally similar to the control noodle sample, while the use of more than 10% negatively affected the sensory parameters. However, it was determined that the use of egg in raw noodle formulation positively affected especially the color, appearance and breakability parameters, and all parameters in cooked noodle samples.

To cite this article:

Cankurtaran Kömürcü, T. & Bilgiçli, N. (2024). Yumurtalı ve yumurtasız formüle edilen Madımak (*Polygonum cognatum*) tozu iaveli eriştelerin fonksiyonel içeriği ve duyusal özellikleri, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 124-138. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.37>

*Sorumlu Yazar: Tekmile Cankurtaran Kömürcü, tekmilecankurtaran@gmail.com



GİRİŞ (INTRODUCTION)

Erişte tipik olarak irmik ve buğday unu veya bunların kombinasyonundan elde edilen tahıl bazlı bir üründür [1]. Erişte pek çok ülkede farklı formülasyon ve üretim teknikleri ile üretilen yaygın tüketime sahip bir üründür. Erişteler basit olarak "beyaz tuzlu", "alkali" ve "yumurtalı" erişte olarak sınıflandırılabilir. Beyaz tuzlu erişteler esas olarak un, su ve NaCl içerir; alkali erişteler, sodyum ve potasyum karbonat tuzlarının çeşitli kombinasyonlarını (bazen sodyum hidroksit); ve yumurtalı erişteler, sıvı veya kurutulmuş olarak eklenen yumurtaları içerir [1,2]. Ülkemizde ise erişte yaygın olarak buğday unu, su, sofrata tuzu ve yumurtadan üretilir. Eriştenin muazzam bir renk yelpazesi vardır. Renkteki çeşitlilik erişte ingredientlerine (örneğin alkali tuzların veya yumurtaların varlığı/yokluğu) ve buğday çeşidine ("genotip") atfedilebilir [3, 4, 5]. Beyaz tuzlu eriştelerde, unun doğal rengi mevcuttur [6]. Alkali erişteler nötr pH'ta renksiz olan, ancak nişastadan ayrılan ve yüksek pH'ta sarıya dönen flavon apigenin-glikozitlerden dolayı değişken miktarda sarı renk pigmenti içerirler. Yumurtalı erişteler ise yumurta sarısındaki pigmentler nedeniyle beyaz tuzlu erişteler ve alkali eriştelerden daha fazla miktarda sarı renge sahiptirler [7, 8].

Tahılların sağlık üzerindeki olumlu etkilerini gösteren çalışmalara olan ilginin artmasıyla birlikte makarna ve benzeri gıda ürünlerinin üretimindeki modern eğilimler arasında kolesterol kontrolü nedeniyle yumurta kullanımının azaltılması yer almaktadır. Ayrıca, yumurtanın yüksek kolesterolü yanında, gıda güvenliği ve yüksek maliyeti konusundaki endişeler yumurtanın yerini alacak bitkisel kaynaklı protein ikamelerinin kullanılmasının önünü açmıştır. Ancak yumurta, çeşitli teknolojik özellikleri nedeniyle birçok gıda ürününde kullanılan fonksiyonel bir üründür [9, 10]. Yumurta, makarna ve benzeri ürünlerin besin içeriğini, rengini, dokusunu ve pişme özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır [11]. Yumurta albümini proteini, yumurtalı eriştelerde sağlam bir doku oluşumuna yardım ederek ve pişirme sırasında nişastayı tutan ağı güçlendirerek pişirme kalitesini artırırken, yumurta sarısı erişteye koyu sarı bir renk vermektedir [12].

Anadolu, bitki örtüsünün zenginliği açısından dünyanın en önemli bölgelerinden birisi olup, bu türlerin birçoğunun endemik olduğu yani sadece Anadolu'da yetiştiği bilinmektedir [13]. Madımak (*Polygonum cognatum* Meissn.), Kuzukulağıgiller ailesinden ve toprak üstü yapraklı gövdesi sebze olarak tüketilen Anadolu'nun endemik otsu bitkilerinden birisidir [13, 14, 15]. Bununla birlikte halk tarafından idrar söktürücü ve diyabet gibi hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır [16,14,17]. Ülkemizde, özellikle Orta Anadolu'da (Yozgat, Tokat, Sivas, Amasya illerinde) ilkbaharda yetişmekte ve insanlar tarafından yoğun olarak tüketilmektedir. Şimdiye kadar geleneksel olarak toplanarak evlerde tüketilen madımak artan şehirleşmeyle birlikte ve tüketicilerin daha sağlıklı doğal kaynaklı gıdalara artan talebini karşılamak amacıyla ticari bir ürün olarak pazarlarda satılmaya başlanmıştır [16, 17, 18,19].

Günümüzde yemek ve salatalar dışında madımak bitkisinin değerlendirildiği bir çalışma bulunmamakla birlikte toplumun her kesimi tarafından yaygın şekilde tüketilen eriştenin formülasyonunda madımak tozunun kullanıldığı bu çalışmanın amacı; farklı oranlardaki madımak tozunun eriştelerin fiziksel, kimyasal ve duyuşal özelliklerine etkisini değerlendirmektir. Ayrıca yumurtaya karşı çeşitli alerjik rahatsızlıkları olan bireylerin tüketimine uygun formülasyonların besinsel ve teknolojik özelliklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Materyal (Materials)

Erişte üretiminde kullanılmak üzere buğday unu, tuz ve yumurta (yumurtalı erişte

formülasyonları için) Konya’da faaliyet gösteren yerel bir marketten satın alınmıştır. Araştırmada materyal olarak kullanılan madımak otu ise taze olarak Yozgat’tan temin edilmiştir.

Yabancı maddelerinden ayrıldıktan sonra yıkanarak temizlenen madımlar güneşe maruz bırakılmadan oda sıcaklığında 3 gün süresince kurumaya bırakılmışlardır. Laboratuvar tipi öğütücüde (Arçelik K3104, İstanbul, Türkiye) öğütülüp 500 µm’lik metal elekten geçirilerek elde edilen madımak tozu kavanozlara konularak kullanılıncaya kadar -18°C’de (Vestel, CD6001-E, Manisa, Türkiye) muhafaza edilmiştir.

Metot (Methods)

Erişte Üretimi (Production of Noodle)

Yumurtalı ve yumurtasız erişte üretiminde Özkaya ve ark. [20]’nin erişte üretim metodu modifiye edilerek kullanılmıştır. Yumurtalı kontrol erişte formülasyonu; 100 g buğday unu, 0.5 g sofr tuzu, 40 g yumurta ve yeterli miktarda sudan oluşmaktadır. Yumurtasız kontrol erişte formülasyonu ise; 100 g buğday unu, 0.5 g sofr tuzu ve yeterli miktarda sudan oluşmaktadır. Farklı erişte formülasyonlarında kullanılan su miktarları ön denemelerle belirlenmiş olup, 22 ml ile 32 ml arasında değişim göstermiştir. Erişte formülasyonlarında madımak tozu %0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında rafine buğday unu ile yer değiştirme esasına göre kullanılmıştır.

Fiziksel ve Teknolojik Analizler (Physical and Technologic Analyses)

Renk ölçümü (Color measurement); Buğday unu, madımak tozu, çiğ ve pişmiş erişte örneklerinin renk özellikleri Minolta CR-400 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. L* (parlaklık), a* (kırmızı-yeşil) ve b* (sarı- mavi) değerleri belirlenmiş, Hue değeri $a^* > 0$ ve $b^* > 0$ için $\arctan(b^*/a^*)$; $a^* < 0$ ve $b > 0$ için $\arctan[b^*/a^*] + 180^\circ$ formülü ile, SI değeri ise $(a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ formülü ile hesaplanmıştır.

Pişme özellikleri ve sıklık (Cooking properties and firmness); Yumurta ilavesiz ve yumurta ilaveli erişte örneklerinin ağırlık ve hacim artışı değerleri Özkaya ve Özkaya [21] ve Oh ve ark. [22] tarafından belirtilen metot kullanılarak tespit edilmiştir. Suya geçen madde miktarını (SGMM) belirlemek için AACC [23] metodu kullanılmıştır.

Erişte örneklerinin sıklık tayini AACC Standart Metot No: 16-50-01[24] yöntemi esas alınarak, tekstür analiz cihazı (TA-XT plus, Stable Mikrosistemleri, İngiltere) ile gerçekleştirilmiştir. Erişteler pişirildikten 5 dk sonra 3 adet erişte yan yana dizilerek düz kesme bıçağı (7 cm x 11.5 cm x 3 0.3 cm) ile sıkıştırılarak sıklık değeri g olarak belirlenmiştir. Her numune için beş ölçüm yapılmış ve sonuçlar, beş ölçümün ortalaması olarak verilmiştir.

Antioksidan Aktivite Analizleri (Analysis of Antioxidant Activity)

Antioksidan aktivite analizinde DPPH, FRAP ve CUPRAC olmak üzere 3 farklı metot kullanılmıştır. 1 gr örnek 10 ml %80’lik metanolden oluşan ekstraksiyon çözeltisi (metanol / su, 80:20, v/v) ile karıştırılmış ve karışım 2 saat oda sıcaklığında (24±1 °C) çalkalamalı su banyosunda çalkalanmış ardından 3000 rpm’ de 10 dk santrifüj edilmiştir. Elde edilen süpernatantlar filtreden geçirilerek analizlerde kullanılmıştır.

DPPH metodu ile toplam antioksidan aktivite analizi; Hammadde ve örneklerin antioksidan aktivite analizinde DPPH (2-2-Diphenyl-2-picrylhydrazyl) metodu Gyamfi ve ark. [25], ile Beta ve ark. [26],’nin metodları modifiye edilerek kullanılmıştır. Metodun temelini, bir serbest radikal olan DPPH’in örnekte bulunan antioksidan maddeler tarafından yok edilmesi esası oluşturmaktadır. Bunun için 100 µl örnek ekstraktı üzerine yeni hazırlanmış 3.9 ml DPPH çözeltisi ilave edilmiştir. Karanlık ortamda 30 dakika bekletildikten sonra spektrofotometrede 517 nm’de absorbans

ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar troloks eşdeğeri cinsinden ifade edilmiştir.

FRAP metodu ile toplam antioksidan aktivite analizi; FRAP (Demir İndirgeme Antioksidan Gücü) metodu ile aktivite tayininde Gao ve ark. [27]'nin metodu kullanılmıştır. 300 mmol/L asetat tamponu, 10 mmol/L TPTZ (2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine) çözeltisi ile 20 mmol/L FeCl₃.6H₂O çözeltisi sırası ile 10:1:1 oranında karıştırılarak analiz çözeltisi hazırlanmıştır. 50 µl örnek ekstraktı üzerine 700 µl analiz çözeltisi ilave edilerek karanlıkta 5 dakika bekledikten sonra UV-Visible spektrofotometrede 593 nm'de absorbans ölçülmüştür. Sonuçlar troloks eşdeğeri cinsinden ifade edilmiştir.

CUPRAC metodu ile toplam antioksidan aktivite analizi; CUPRAC (Bakır (II) İyonu İndirgeme Esaslı Antioksidan Kapasite) metodu ile antioksidan aktivite tayininde Apak ve ark. [28]'nin metodu kullanılmıştır. Bir cam tüp içerisine 10⁻² M CuCl₂, 1M NH₄AC (Amonyum asetat tamponu, Ph;7) ve 7.5x10⁻³ M neokuproin çözeltisinden sırasıyla 1'er ml eklenmiş ve üzerine 0.1 ml antioksidan çözeltisi ve 1 ml distile su ilave edilip tüpler vortekslenmiştir. Toplam hacim 4.1 ml olacak şekilde hazırlanan çözeltiler oda koşullarında ağzı kapalı olarak 30 dakika boyunca bekletilmiştir. Bu süre sonunda içinde örnek yerine ekstraksiyon çözeltisi bulunan referans çözeltilere karşı 450 nm'de absorbans değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar troloks eşdeğeri cinsinden ifade edilmiştir.

Serbest, Bağlı ve Toplam Fenolik Madde Miktarı Analizleri (Analysis of Free, Bound and Total Phenolic Content)

Hammadde ve örneklerin, serbest ve bağlı fenolik madde içeriğinin belirlenmesi için ekstraksiyon işlemi Vitali ve ark. [29] tarafından belirtilen yöntemle yapılmıştır. Serbest fenolik ekstraksiyonu için; hammaddeler ve erişte örnekleri (1 g), 10 ml %1 asitlendirilmiş (HCl) metanol:su çözeltisiyle (80:20, v/v) karıştırılmıştır. Karışım oda sıcaklığında (24±1 °C) 2 saat çalkalanarak ekstrakte edilmiş ve karışım 3000 rpm'de santrifüj edilerek ayrılan süpernatant, analiz için -20°C'de muhafaza edilmiştir. Bağlı fenolik ekstraksiyonu için; serbest fenolik ekstraksiyonu sonrası geriye kalan kalıntıya 20 ml metanol/H₂SO₄ (10:1) ilave edilmiş ve karışım, 85°C'de çalkalamalı su banyosunda 20 saat inkübe edildikten sonra soğutulan süpernatant, santrifüjleme yoluyla ayrılmış ve analiz edilinceye kadar -20°C'de muhafaza edilmiştir.

Her bir ekstraktın serbest ve bağlı fenolik miktarı, Naczki ve Shahidi [30] tarafından verilen Folin-Ciocalteu kolorimetrik yöntemine göre belirlenmiştir. Toplam fenolik madde (TFM) miktarı, serbest ve bağlı fenolik içeriğin toplanmasıyla elde edilmiştir. Standart olarak gallik asit kullanılmış ve sonuçlar kuru madde bazında (serbest fenolik $y=0.0014x-0.1072$, $R^2 = 0.9965$ ve bağlı fenolik için $y=0.0012x+0.0662$, $R^2 = 0.9976$) gallik asit eşdeğerleri (mg GAE kg⁻¹) cinsinden ifade edilmiştir.

Duyusal Analiz (Sensory Analysis)

Yumurta ilavesiz ve yumurta ilaveli erişte örneklerinin duyuşsal analizleri çiğ ve pişmiş örneklerde gerçekleştirilmiştir. Çiğ erişte örneklerinde renk, görünüş, koku, kırılabilirlik ve genel kabul edilebilirlik parametreleri, pişmiş örneklerde ise renk, görünüş, tat, koku, yapışkanlık ve genel kabul edilebilirlik parametreleri 12 panelist (23- 52 yaş) tarafından değerlendirilmiştir. Panelistler örneklerin duyuşsal parametrelerini, 1-7 hedonik skalası (1: aşırı kötü, 7: aşırı iyi) kullanılarak değerlendirilmiştir.

İstatistiksel Analizler (Statistical Analysis)

İstatistiksel analiz, JMP istatistik programı, sürüm 10.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ortalamalar çoklu karşılaştırma testi kullanılarak

karşılaştırılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Eriştelerin Renk Özellikleri (Color Properties of Noodle Samples)

Erişte rengi tüketicinin dikkate aldığı en önemli kalite özelliklerinden biridir. Farklı oranlarda madımak tozu kullanılarak üretilen çiğ (pişmemiş) ve pişmiş erişte örneklerine ve hammaddelere ait renk değerleri Tablo 1 ve 2’de verilmiştir. Tablo 1 de görülebileceği gibi, çiğ erişte örneklerinin renk değeri sonuçları, erişte formülasyonunda yumurta kullanılıp kullanılmama durumuna göre “yumurta ilavesi” faktörü ve “madımak tozu ilave oranı” faktörü açısından karşılaştırılmıştır.

Tablo 1’de verilen analiz sonuçlarına göre; yumurta ilaveli çiğ erişte örneklerinin ortalama b^* ve SI değerleri (24,37 ve 25,75) yumurta içermeyen erişte örneklerden (21,53 ve 23,00) daha yüksek bulunurken, yumurta kullanımı erişte örneklerinin L^* ve Hue değerlerinin (52,56 ve 107,64) azalmasına neden olmuştur. Demir ve ark. (2010) nohut unu ile hazırlanan erişte formülasyonuna yumurta eklenmesinin bu çalışmanın aksine L^* ve a^* değerlerini arttırdığını ve b^* değerini azalttığını belirtmişlerdir. Aydın ve Göçmen [33] ve Cankurtaran Kömürücü [34] ise yumurta kullanımının erişte örneklerinin b^* değerini arttırdığını bildirmişlerdir. Yumurta nihai renge katkısı açısından önemli olup, bu katkı muhtemelen yumurtanın yüksek karotenoid içeriğiyle ilgilidir. Alamprese [35], yumurtaların A vitamini aktivitesine sahip farklı oranlarda retinol içerdiğini ve retinolün, makarna gibi gıda ürünlerinin çekici parlak sarı renginden sorumlu olan karotenoid içeriğine katkıda bulunduğunu bildirmiştir. Genel olarak erişte formülasyonunda madımak tozunun ilave miktarının artması L^* , a^* , b^* ve SI değerlerinde azalışa, Hue değerinde ise artışa neden olmuştur.

Tablo 1. Çiğ erişte örneklerinin renk değerlerine ait çoklu karşılaştırma testi sonuçları¹ (Multiple comparison test results of the raw noodles’ color values)

FAKTÖR	n	L^*	a^*	b^*	HUE	SI
Yumurta ilavesi						
Yumurta ilavesiz	10	54.56±10.26a	-7.57±2.51a	21.53±1.86b	109.85±6.65a	23.00±1.33b
Yumurta ilaveli	10	52.56±10.85b	-7.27±3.58a	24.37±5.03a	107.64±9.85b	25.75±4.22a
		**2	ns ³	*4	*	*
MTİO (%)						
0	4	73.10±0.53a	-1.68±1.34a	28.49±3.76a	93.68±3.17d	28.57±3.67a
5	4	52.37±1.25b	-8.50±0.40b	23.69±0.58b	109.76±0.66c	25.17±0.64b
10	4	49.24±1.69c	-8.73±0.34b	22.75±1.13b	111.03±1.22bc	24.37±1.06bc
15	4	47.19±1.46d	-8.92±0.14b	20.59±1.16c	113.50±1.50ab	22.44±1.02bc
20	4	45.93±0.96e	-9.26±0.09b	19.23±1.29c	115.79±1.55a	21.35±1.16c
		**	**	**	**	**
Hammaddeler						
Buğday unu		94.72±0.16	-5.02±0.07	13.93±0.10	109.82±0.19	14.81±0.11
Madımak tozu		61.29±0.16	-13.05±0.11	28.55±0.17	114.57±0.11	31.39±0.19

¹Sonuçlar iki tekerrürün ortalamasıdır. Ortalamalar “yumurta ilavesi” ve “MTİO (madımak tozu ilave oranı)” faktörlerine göre karşılaştırılmıştır. Farklı harfle işaretlenmiş, aynı sütundaki ortalamalar istatistiki olarak birbirinden farklıdır. **p<0.01 düzeyinde önemli, ³ns: önemsiz, ⁴* p<0.05 düzeyinde önemli.

Pişmiş erişte örneklerinin renk değerleri incelendiğinde, yumurta ilavesinin ortalama b^* ve SI değerlerini artırdığı görülmektedir (Tablo 2). Erişte de artan oranda madımak tozu kullanımı ise L^* ve a^* değerlerini düşürmüştür. Hue değeri ise sadece %20 madımak tozu kullanım oranında artmıştır.

Renk analiz sonuçları çiğ ve pişmiş erişte örnekleri açısından karşılaştırıldığında ise pişirme işlemi erişte örneklerinin tüm renk değerlerini sayısal olarak azaltmıştır. Bu durum pişirme sırasında uygulanan ısı işleminden ve pişme sırasında eriştenin sarı renginden sorumlu karotenoidlerin kısmen pişme suyuna geçmesi ve/veya parçalanmasından kaynaklanmış olabilir.

Tablo 2. Pişmiş eriştelelerinin renk değerlerine ait çoklu karşılaştırma testi sonuçları¹ (Multiple comparison test results of cooked noodles' color values¹)

FAKTÖR	n	L*	a*	b*	HUE	SI
Yumurta ilavesi						
Yumurta ilavesiz	10	53.82±9.05a	-5.61±0.61a	19.44±2.31b	106.17±1.10a	20.24±2.36b
Yumurta iaveli	10	52.41±11.56a	-5.98±1.08a	22.95±1.24a	104.71±3.15a	23.75±0.99a
		ns ²	ns	** ³	ns	**
MTİO (%)						
0	4	71.28±1.88a	-4.52±0.62a	20.45±5.04a	103.29±4.79b	21.00±4.77a
5	4	54.51±0.84b	-5.65±0.58b	20.48±3.32a	105.52±1.11ab	1.24±3.35a
10	4	49.27±0.79c	-5.82±0.58b	21.96±1.37a	104.82±0.61ab	22.71±1.47a
15	4	46.93±2.96c	-6.33±0.40bc	21.47±0.62a	106.41±0.56ab	22.38±0.71a
20	4	43.59±1.35d	-6.67±0.14c	21.61±0.33a	107.16±0.50a	22.61±0.30a
		**	**	ns	ns	ns

¹Sonuçlar iki tekerrürün ortalamasıdır. Ortalamalar “yumurta ilavesi” ve “MTİO (madımak tozu ilave oranı)” faktörlerine göre karşılaştırılmıştır. Farklı harfle işaretlenmiş, aynı sütundaki ortalamalar istatistiki olarak birbirinden farklıdır. ² ns: önemsiz, ³** p<0.01 düzeyinde önemli.

Erişte Örneklerinin Pişme Kalitesi (Cooking Quality of Noodle Samples)

Yumurta ilavesiz ve yumurta iaveli erişte örneklerinin pişme ve sıklık özelliklerine ait sonuçlar Tablo 3’te verilmiştir. Yumurta kullanımı erişte örneklerinin ağırlık artışı, hacim artışı, SGMM ve sıklık değerleri üzerinde önemli farklılıklara neden olmuştur (Tablo 3). Yumurta iaveli erişte örneklerinin ağırlık artışı, hacim artışı ve SGMM değerleri yumurta ilavesiz erişte örneklerine göre daha düşük bulunmuştur. Bu durum yumurtanın yapışma ve birleştirme özellikleriyle ilgili olabilir [36]. Ayrıca yumurtada dört serbest sistein-tiyol ve bir disülfid köprüsü bulunan ovalbumin, gluten proteinleri ile etkileşime girerek protein ağını güçlendirir; pişirme sırasında nişastanın şişmesini önler ve makarnanın daha iyi pişme davranışı sergilemesini sağlar [2]. Bu sonuçlar Özkaya ve ark. [20], Demir ve ark. [36] ve Cankurtaran Kömürcü [34]’ün sırasıyla buğday unu, nohut unu ve ilkel buğday unlarından üretilen eriştelelerin pişme özellikleri ile benzerlik göstermektedir. Erişte formülasyonunda %5 in üzerinde madımak tozu kullanımı ağırlık artışı, hacim artışı ve SGMM gibi tüm pişirme parametrelerinde artışa neden olmuştur. Madımak tozu kullanılmayan erişte örneklerinin ortalama ağırlık artışı, hacim artışı ve SGMM değerleri sırasıyla %100,82, %129,52 ve %3,39 olarak belirlenirken, madımak tozu ilave oranının %20 ye çıkması ile aynı değerler sırayla %125,80, %203,19 ve %6,57 olarak belirlenmiştir. %20 madımak tozu ilavesi ile örneklerin ağırlık ve hacim artışı değerleri sırasıyla 24.78% ve 56.87%, oranında artış göstermiştir. Bu durum madımak tozunda da yüksek oranda bulunan liflerin yüksek su tutma kapasitesi ile uyumludur [37, 38]. %20 oranında madımak tozu ilavesi hiç madımak tozu içermeyen erişte örneği ile karşılaştırıldığında SGMM değerinde yaklaşık %93,81’lik bir artışa neden olmuştur. Bu durum madımak tozu ilavesi nedeniyle glutenin seyrelmesine ve gluten matrisindeki bozulmayla ilişkili olabilir. Aravind ve ark. [42] erişte gibi ürünlerin formülasyonlarına nişasta-gluten ağını olumsuz etkileyecek bileşenlerin dahil edilmesinin pişme kaybını artıracakını bildirmişlerdir.

Eriştelelerin tekstürel özelliklerinden sıklık değeri Tablo 3’te verilmiştir. Yumurta ilave faktörüne göre; ortalama sıklık değeri, yumurta ilavesiz olarak hazırlanan erişte örneklerinde (844,55 g), yumurta ilave edilerek hazırlanan erişte örneklerinden (941,80 g) daha düşük bulunmuştur. Yumurtadaki proteinler, özellikle yumurta beyazındaki ovalbümin, kompakt bir protein ağının oluşmasına katkıda bulunarak daha sıkı ve sert bir hamur oluşmasına yardımcı olmuş olabilir [2]. Eriştelelerin sıklık özelliği madımak tozu ilave oranının artması ile azalmıştır. Madımak tozu ilave edilmeyen erişte örneğinin sıklık değeri 1162,14 g olarak belirlenirken, %20 madımak tozu iaveli erişte örneğinin ortalama sıklık değeri 696,21 g olarak ölçülmüştür. Sıklıktaki bu azalma, gluten ağının zayıflaması ve glutenin, madımak tozu gibi yüksek lif içeriğine sahip bileşenlerin ilavesi nedeniyle seyrelmesinin bir sonucu olabilir [43,42]. Benzer sonuçlar Cankurtaran Kömürcü ve Bilgiçli [44] tarafından da elde edilmiş ve ilkel buğday unlarının yüksek lif içeriği nedeniyle erişte örneklerinin sıklık değerlerinin azaldığı bildirilmiştir.

Tablo 3. Eriştelerin pişme analizi ve sıklık değerlerine ait çoklu karşılaştırma testi sonuları¹ (Multiple comparison test results of noodles' cooking analysis and firmness values¹)

FAKTÖR	n	AĞIRLIK ARTIŞI (%)	HACİM ARTIŞI (%)	SGMM ² (%)	SIKILIK (g)
Yumurta ilavesi					
Yumurta ilavesiz	10	129.42±14.43a	183.53±31.00a	5.89±1.49a	844.55±176.12b
Yumurta ilaveli	10	98.91±5.79b	129.02±26.79b	4.42±0.94b	941.80±151.44a
		**4	**	**	**
MTİO (%)					
0	4	100.82±12.77c	129.52±34.01d	3.39±0.44c	1162.14±55.25a
5	4	109.68±13.77bc	133.07±32.99cd	4.61±0.86b	911.45±55.25b
10	4	112.05±14.64b	152.47±25.84bc	5.05±0.58b	876.28±40.62b
15	4	122.48±25.40a	163.13±28.19b	6.16±1.04a	819.80±42.21c
20	4	125.80±22.82a	203.19±39.94a	6.57±1.42a	696.21±17.85d
		**	**	**	**

¹Sonular iki tekerrürün ortalamasıdır. Ortalamalar “yumurta ilavesi” ve “MTİO (madımak tozu ilave oranı)” faktörlerine göre karşılaştırılmıştır. Farklı harfle işaretlenmiş, aynı sütundaki ortalamalar istatistiki olarak birbirinden farklıdır. ⁴** p<0.01 düzeyinde önemli.

Eriştelerin Antioksidan Aktivite ve Fenolik Madde Miktarları (Antioxidant Activity and Phenolic Content of Noodles)

Araştırmalar, doğal bir ürünün antioksidan özelliklerini tek bir yöntemle değerlendirmenin yeterli olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, gıdanın antioksidan özelliklerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için çeşitli antioksidan aktivite analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada erişte örneklerinin antioksidan aktivitelerini belirlemek amacıyla; hızlı, kolay, tekrarlanabilir ve ekonomik olan DPPH, FRAP ve CUPRAC olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır.

Tablo 4. Çiğ eriştelerin antioksidan aktivite ve fenolik madde miktarlarına ait çoklu karşılaştırma testi sonuları¹ (Multiple comparison test results of antioxidant activity and phenolic content amounts of raw noodles¹)

FAKTÖR	n	ANTIOKSİDAN AKTİVİTE			FENOLİK MADDE		
		DPPH (mg TE/kg)	FRAP (μmol TE/g)	CUPRAC (μmol TE/g)	SFM ² (mg GAE/kg)	BFM ³ (mg GAE/kg)	TFM ⁴ (mg GAE/kg)
Yumurta ilavesi							
Yumurta ilavesiz	10	1319.50±753.1b	7.18±4.06b	37.42±25.5b	2280.47±535.2b	4400.69±624.9b	6681.16±1155.2b
Yumurta ilaveli	10	1455.43±787.1a	7.51±4.15a	41.14±27.0a	2503.09±532.2a	5122.40±770.3a	7211.10±1339.2a
		**	**	**	**	**	**
MTİO (%)							
0	4	213.09±28.9e	0.51±0.12e	4.58±0.2e	1690.35±33.5e	4046.96±743.1d	5368.84±64.1e
5	4	897.56±60.4d	5.57±0.13d	18.91±2.5d	2048.13±253.5d	4326.51±626.1cd	6086.50±315.3d
10	4	1695.58±210.9c	9.34±0.36c	41.80±2.1c	2352.58±187.4c	4620.27±512.6c	6761.09±361.1c
15	4	1970.83±63.4b	10.29±0.21b	58.47±4.4b	2795.05±144.8c	5147.54±438.3b	7912.82±511.2b
20	4	2160.26±50.9a	11.01±0.20a	72.62±2.5a	3072.79±165.9a	5666.46±412.9a	8601.40±332.2a
		**	**	**	**	**	**
Hammaddeler							
Buğday unu		115.81±3.24	0.47±0.11	3.16±0.76	766.03±7.58	4173.90±15.41	4939.94±23.12
Madımak tozu		28906.84±43.25	83.57±1.23	20.94±2.54	28565.70±42.54	5965.95±11.21	34531.65±34.87

¹Sonular iki tekerrürün ortalamasıdır. Ortalamalar “yumurta ilavesi” ve “MTİO (madımak tozu ilave oranı)” faktörlerine göre karşılaştırılmıştır. Farklı harfle işaretlenmiş, aynı sütundaki ortalamalar istatistiki olarak birbirinden farklıdır. ²2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radikalinin inhibisyonu. ³Ferrik iyonlarını indirgeme kuvveti. ⁴Bakır iyonlarını indirgeme kuvveti. ⁵Serbest fenolik madde miktarı. ⁶Baęlı fenolik madde miktarı. ⁷Toplam fenolik madde miktarı. ⁴** p<0.01 düzeyinde önemli.

Erişte örneklerinin antioksidan aktivite (DPPH, FRAP ve CUPRAC) ve fenolik madde miktarı (serbest, bağlı ve TFM miktarı) analizleri hem çiğ hem de pişmiş erişte örneklerinde yapılmış olup, sonuçlar Tablo 4 ve 5'te verilmiştir. Tablo 4 iğ erişte örneklerinin DPPH, FRAP ve CUPRAC değerleri açısından incelendiğinde; erişte formülasyonunda yumurta kullanılmasının, pişmemiş erişte örneklerinin DPPH, FRAP ve CUPRAC değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Üç farklı yöntemle göre elde edilen antioksidan aktivite değerleri yumurta içeren çiğ eriştelerde daha yüksek bulunmuştur. Yumurta ilaveli erişte örneklerinin yüksek antioksidan aktivite içeriği, yumurtanın karotenoid içeriği ile ilişkili olabilir. Yumurtalar genellikle antioksidan içeriği

zengin gıdalar olarak kabul edilmez, ancak E ve A vitaminleri, selenyum, fosfolipitler ve karotenoidler gibi birçok bileşii antioksidan özellikler sergiler [45, 46]. Bu nedenle yumurta ilaveli erişte örneklerinin antioksidan aktivite değerleri daha yüksek bulunmuş olabilir.

Artan oranda (%0-20) madımak tozu ilaveli çii erişte örneklerinin DPPH, FRAP ve CUPRAC değerleri sırasıyla 213,09-2160,26 mg TE/kg, 0,51-11,01µmol TE/g ve 4,58-72,62µmol TE/g arasında değişmektedir (Tablo 4). Erişte formülasyonunda %20 madımak tozu kullanımı, çii erişte örneklerinin DPPH, FRAP ve CUPRAC antioksidan aktivite değerlerini madımak tozu kullanılmayan erişte örneğine göre sırasıyla yaklaşık 10,1, 21,6 ve 15,9 kat arttırmıştır. Bu durum madımak tozunun yüksek antioksidan aktivite değeri ile ilişkili olabilir. Diğer taraftan erişte formülasyonundaki miktarı %100-80 arasında değişen rafine buğday unu üretilirken, buğdayın antioksidan bakımından zengin diş katmanları öğütme işleminde uzaklaştırılmaktadır [47]. Bu nedenle rafine buğday unundan hazırlanan ürünler antioksidan maddelere ilaveten pek çok besinsel ve fonksiyonel bileşen açısından daha fakirdir [48].

Tablo 4 incelendiğinde de madımak tozunun antioksidan aktivite açısından buğday unundan oldukça zengin olduğu görülmektedir. Antioksidan aktivite sonuçlarına ait veriler eriştelelerin pişirilmesinin ardından analiz edildiğinde (Tablo 5); yumurta ilaveli erişte örneklerinin çii erişte örneklerine benzer şekilde daha yüksek DPPH, FRAP ve CUPRAC antioksidan aktivite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Artan madımak tozu ilave oranına paralel olarak pişmiş örneklerinde antioksidan aktivite değerlerinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte pişme işleminin ardından erişte örneklerinin ortalama DPPH, FRAP ve CUPRAC değerlerinin çii olanlardan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çii ve pişmiş erişteleler arasındaki antioksidan aktivite değerlerindeki farklılıklar kısmen antioksidan aktivite gösteren bileşiklerin pişirme suyuna sızmasından kaynaklanıyor olabilir. Khan ve ark. [49], pişirme sırasındaki ısıl işlemin hem pişirme suyuna sızmaya hem de antioksidan aktiviteye katkıda bulunan bileşenlerin bozulmasına neden olduğunu bildirmiştir.

Sonuçlar tüm fenolik madde miktarları açısından incelendiğinde; yumurta ilaveli çii erişte örneklerinin ortalama serbest, bağlı ve TFM miktarlarının (2503,09, 5122,40 ve 7211,10mg GAE/kg), yumurta ilavesiz erişte örneklerinin aynı değerlerinden (2280,47, 4400,69 ve 6681,16 mg GAE/kg) daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durum antioksidan aktivite değerinde de gözlemlendiği gibi yumurtanın fenolik içeriğine katkı sağlayan bileşenleri ile ilgili olabilir.

Erişte formülasyonunda artan oranda madımak tozu kullanımı örneklerin serbest, bağlı ve TFM içeriklerini, madımak tozu içermeyen erişte örneğine göre sırasıyla %81,80, 40,02 ve 60,21 oranında artmasını sağlamıştır. Tablo 4’de de görülebileceği gibi madımak tozunun buğday unundan oldukça yüksek serbest, bağlı ve TFM içeriği, elde edilen sonuçlarla ilişkili olabilir. Antioksidan aktiviteye ve fenolik içeriğe katkı sağlayan bileşenler doğal olarak bitkilerde daha yüksek oranlarda bulunur, dolayısıyla insanlar için bu bileşiklerin temel kaynağı bitkisel kaynaklı ürünlerdir. En önemli biyoaktif bileşenlerin kaynakları meyve ve sebzelerdir [50]. Bu literatür bilgisi madımak tozunun yüksek antioksidan ve fenolik madde içeriğini açıklayabilir. Sonuçlar serbest ve bağlı fenolik bileşenler açısından değerlendirildiğinde; %20 madımak tozu ilaveli erişte örneklerinin, hiç madımak tozu içermeyen erişte örneğine kıyasla, serbest fenolik madde miktarının (%81,80) bağlı fenolik madde miktarlarından (%40,02) daha yüksek oranda arttığı belirlenmiştir. Bu durum bitkisel gıda kaynaklarının serbest fenolik madde miktarının, tahılların aksine bağlı fenolik madde miktarlarından daha yüksek olması ile ilişkili olabilir. Tahıllardaki fenolik bileşikler serbest, çözünür konjuge ve bağlı formlarda bulunur; burada bağlı form, fenolik asitlerin büyük bölümünü temsil eder [51].

Pişmiş erişte örneklerinin serbest, bağlı ve TFM miktarları yumurta ilavesi ve madımak tozu ilavesi faktörleri açısından çii erişte örneklerinin fenolik madde miktarlarına benzer şekilde etkilemiştir (Tablo 5). Pişirme işleminde formülasyonunda yumurta bulunan örnekler çii numunelerde olduğu daha yüksek fenolik madde miktarları sergilemişlerdir. Bununla birlikte %20 oranında madımak

tozu ilavesi erişte örneklerinin serbest, bağlı ve TFM miktarlarını hiç madımak tozu ilave edilmeyen erişte örneğine göre sırasıyla 1,78, 1,23 ve 1,36 kat artırmıştır. Bununla birlikte antioksidanların aksine pişirme işleminin ardından tüm örneklerde serbest fenolik madde miktarı azalırken, bağlı ve TFM miktarları çığ örneklere göre artış göstermiştir. Bu, pişirme sırasında suyun kaynatılmasının bağlı fenoliklerin gıda matrisinden ekstraksiyonunu arttırmasına ve böylece daha sonraki kimyasal ekstraksiyon ve belirleme sırasında bunların miktarında artışa yol açmasına neden olmuş olabilir. Fares ve ark. [52] pişmiş makarna numunelerinin bağlı fenolik madde miktarında gözlenen artışı esas olarak bağlı ferulik asidin ekstraksiyonundaki artışa atfetmişlerdir. Ayrıca yazarlar pişirme sonrası fenolik asitlerin bireysel değişimlerini incelediklerinde; serbest fenolik madde miktarındaki değişimi p-hidroksibenzoikasitinin azalmasına, bağlı fenolik asitler için ise esas olarak ferulik asitinin artışına atfedebileceğini bildirmişlerdir. TFM miktarı, serbest ve bağlı fenolik madde miktarının toplamı olarak hesaplanmış olup, bağlı fenolik madde miktarındaki artışın, serbest fenolik madde miktarındaki azalıştan daha yüksek olması nedeniyle erişte örneklerinin TFM miktarı artış göstermiştir.

Tablo 5. Pişmiş erişte örneklerinin antioksidan aktivite ve fenolik madde miktarlarına ait çoklu karşılaştırma testi sonuçları¹ (Multiple comparison test results of antioxidant activity and phenolic content amounts of cooked noodles¹)

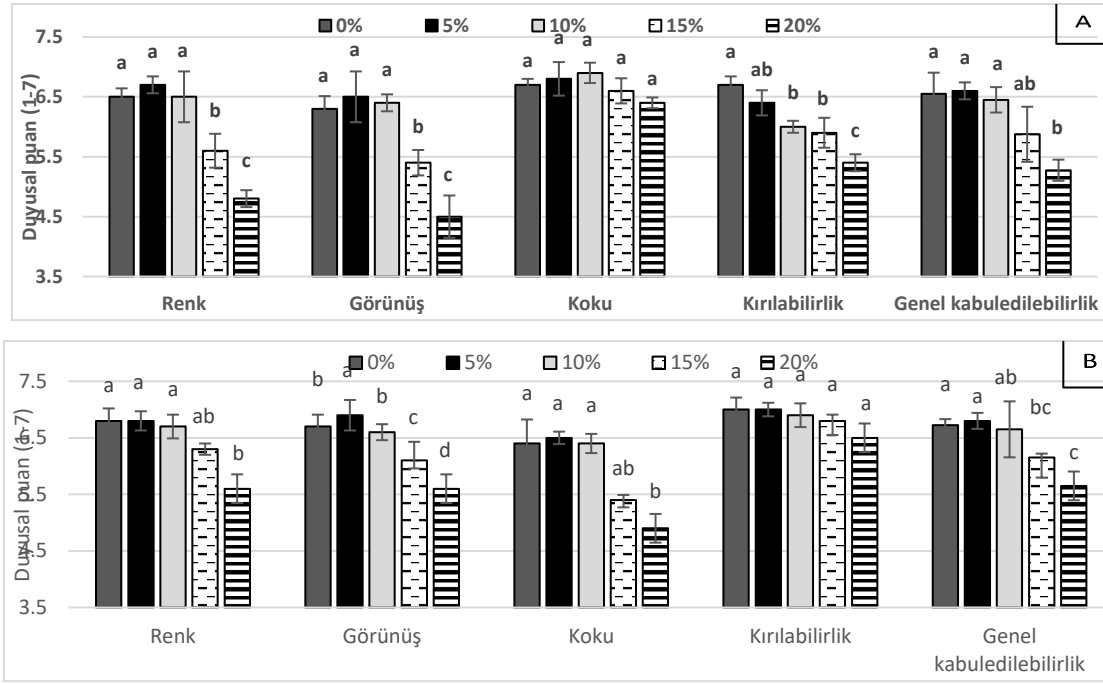
FAKTÖR	n	ANTIOKSİDAN AKTİVİTE			FENOLİK MADDE		
		DPPH (mg TE/kg)	FRAP (μ mol TE/g)	CUPRAC (μ mol TE/g)	SFM ² (mg GAE/kg)	BFM ³ (mg GAE/kg)	TFM ⁴ (mg GAE/kg)
<i>Yumurta ilavesi</i>							
Yumurta ilavesiz	10	1129.99±692.13b	1.70±1.08b	31.25±20.34b	2068.26442.86b	5489.33±395.67b	7557.59±822.62b
Yumurta ilaveli	10	1260.84±762.36a	2.14±1.07a	33.21±21.21a	2359.90±497.10a	5583.99±455.74a	7943.90±935.42a
		**	**	**	**	**	**
<i>MTİO (%)</i>							
0	4	93.77±12.39e	0.41±0.21e	4.37±0.73e	1553.39±111.70e	5052.99±81.48e	6606.39±88.72e
5	4	743.63±76.25d	1.17±0.25d	14.33±1.33d	1941.53±199.20d	5256.82±72.39d	7198.35±248.84d
10	4	1412.35±76.25c	2.19±0.40c	40.35±1.45c	2224.00±281.67c	5480.40±113.03c	7704.40±394.28c
15	4	1766.34±121.68b	2.56±0.35b	45.14±0.79b	2573.61±143.20b	5682.73±71.19b	8256.34±177.48b
20	4	1960.97±113.64a	3.26±0.13a	56.96±2.27a	2777.86±205.31a	6210.37±154.25a	8988.23±329.67a
		**	**	**	**	**	**

¹Sonuçlar iki tekerrürün ortalamasıdır. Ortalamalar “yumurta ilavesi” ve “MTİO (madımak tozu ilave oranı)” faktörlerine göre karşılaştırılmıştır. Farklı harfle işaretlenmiş, aynı sütundaki ortalamalar istatistiki olarak birbirinden farklıdır. ²2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radikalının inhibisyonu. ³Ferrik iyonlarını indirgeme kuvveti. ⁴Bakır iyonlarını indirgeme kuvveti. ⁵Serbest fenolik madde miktarı. ⁶Bağlı fenolik madde miktarı. ⁷Toplam fenolik madde miktarı. ⁴** p<0.01 düzeyinde önemli.

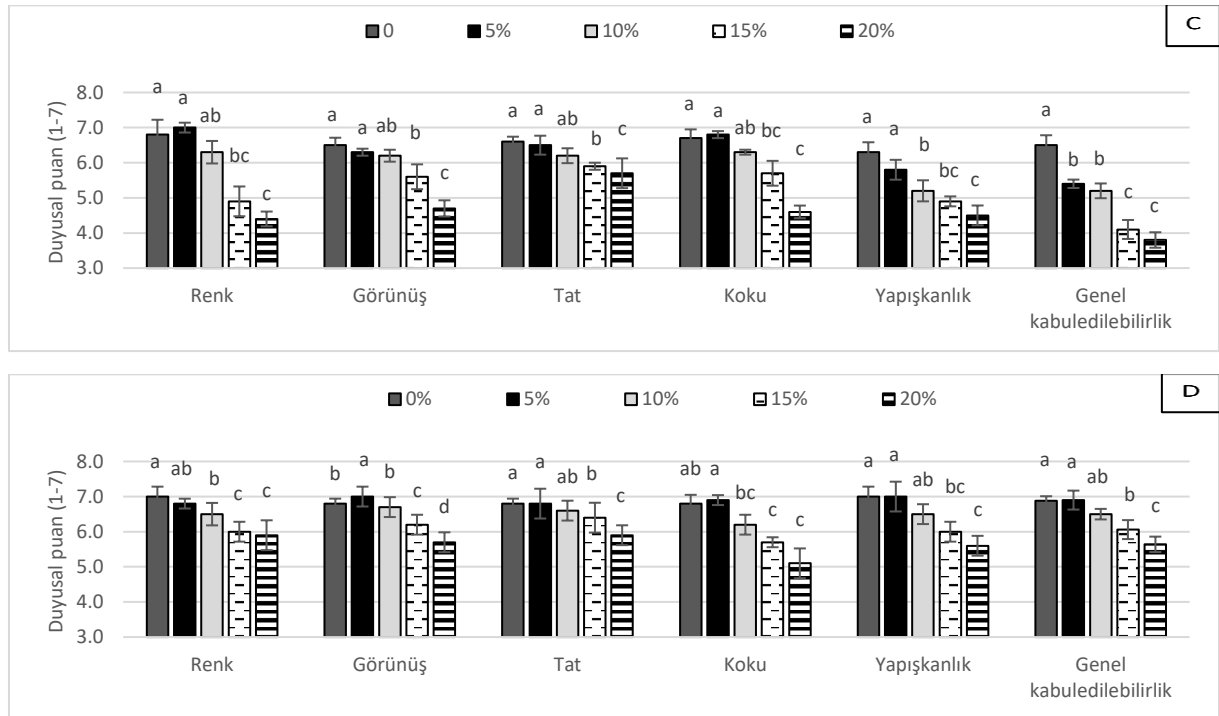
Erişte Örneklerinin Duyusal Analiz Sonuçları (Sensory Properties of Noodle Samples)

Farklı oranlarda madımak tozu ilaveli yumurta ilavesiz ve yumurta ilaveli çığ ve pişmiş erişte örneklerinin duyusal analiz sonuçları Şekil 1 ve 2’de verilmiştir. Genel olarak yumurta ilavesiz çığ erişte örneklerinden %5 ve 10 madımak tozu içeren erişte örnekleri hiç madımak tozu kullanılmayan erişte örneğine benzer renk, görünüş, koku ve genel kabuledilebilirlik özellikleri gösterirken; yumurta ilaveli erişte örneklerinde ise renk, koku, kırılabilirlik ve genel kabuledilebilirlik özellikleri madımak tozu kullanılmayan erişte örneğine eşdeğer olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yumurta ilavesiz erişte örneklerinin koku, yumurta ilaveli erişte örneklerinin ise kırılabilirlik özellikleri artan madımak tozu ilavesinden etkilenmemiştir.

Panelistler tarafından %5 madımak tozu içeren yumurtalı ilaveli çığ erişte örneklerinin görünüş özelliği hiç madımak tozu kullanılmayan çığ erişte örneğinden daha çok beğenilmiştir. %15 ve %20 madımak tozu ilavesi genel olarak hem yumurta ilavesiz hem de yumurta ilaveli çığ erişte örneklerinin duyusal parametre skorlarının azalmasına neden olmuştur. Sonuçlar yumurta kullanımı açısından değerlendirildiğinde; yumurtalı formülasyonların renk, görünüş özellikleri ile birlikte kırılabilirlik değerleri daha yüksek sayısal puanlar almıştır. Bu durum yumurtanın sarı renginden kaynaklı olarak erişteye istenen sarı- parlak rengi kazandırması ve yapısal özellikleri iyileştirmesi ile ilgili olabilir.



Şekil 1. Yumurta ilavesiz (A) ve yumurta ilaveli (B) çiğ erişte örneklerine ait duyu analiz sonuçları. Sensory analysis results of raw noodle samples without egg (A) and with egg addition (B).



Şekil 2. Yumurta ilavesiz (C) ve yumurta ilaveli (D) pişmiş erişte örneklerine ait duyu analiz sonuçları. Sensory analysis results of cooked noodle without egg (C) and with egg addition (D).

Sonuçlar pişmiş erişte örnekleri açısından değerlendirildiğinde; yumurta ilavesiz %5 ve 10 oranında madımak tozu ilave edilerek hazırlanan erişte örnekleri panelistlerden hiç madımak tozu ilave edilmeyen erişte örneğine benzer renk, görünüş, tat ve koku puanları alırken, daha yüksek oranda madımak tozu ilavesi bu puanları olumsuz etkilemiş ve yumurta ilavesiz pişmiş erişte örnekleri arasında %20 madımak tozu ilaveli erişte örnekleri tüm duyu parametreleri açısından en düşük sayısal

puanlarla değerlendirilmiştir. Yumurta ilavesi, çığ erişte örneklerinde olduğu gibi pişmiş erişte örneklerinin de görünüş özelliğini geliştirmiştir. Bununla birlikte %5 madımak tozu içeren yumurta ilaveli pişmiş erişte örneklerinin renk, görünüş, tat, koku, yapışkanlık ve genel kabul edilebilirlik özellikleri hiç madımak tozu ilave edilmeyen erişte örneğinden sayısal olarak daha yüksek ya da benzer puanlar almıştır. Artan madımak tozu ilavesi pişmiş erişte örneklerinin duyuşal skorlarını azaltmış olsa da, yumurta ilaveli pişmiş erişte örnekleri panelistlerden yumurta ilavesiz olanlardan daha yüksek puanlar almıştır.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tahılların sağık üzerindeki olumlu etkilerini gösteren çalışmalara olan ilginin artmasıyla birlikte makarna ve benzeri gıda ürünlerinin üretimindeki modern eğilimler arasında kolesterol kontrolü nedeniyle yumurta kullanımının azaltılması yer alıyor. Ancak yumurta, çeşitli teknolojik özellikleri nedeniyle birçok gıda ürününde kullanılan fonksiyonel bir üründür. Yumurta, makarna ve benzeri ürünlerin besin içeriğini, rengini, dokusunu ve pişme özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Bu çalışmada madımak tozu ve yumurta kullanımının eriştenin fiziksel, fonksiyonel ve duyuşal özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Erişte formülasyonunda yumurtanın kullanılması çığ ve pişmiş erişte örneklerinin b* değerini, antioksidan aktivite ve fenolik madde miktarlarını arttırmıştır. Pişmiş eriştenin b* renk değeri çığ erişteye göre daha düşük bulunmuş ancak yine de yumurta erişte örneklerinin daha sarı renkte olmasını sağlamıştır. Yumurta kullanımı eriştelerin pişme özelliklerini geliştirmekle kalmamış, aynı zamanda sıklık değerini de arttırmıştır. Madımak tozunun %5 in üzerinde kullanımı erişte örneklerinin L*, a* ve b* değerlerinin azalmasına, ağırlık artışı, hacim artışı ve SGMM değerlerinin artmasına neden olmuştur. Rafine buğday unu yerine artan miktarlarda madımak tozu kullanılması DPPH, FRAP ve CUPRAC antioksidan aktivite değerleri ile birlikte serbest, bağı ve TFM miktarlarını arttırmış ve fonksiyonel özellikleri yüksek erişte örnekleri elde edilmiştir. Bu artış yumurta ilaveli erişte örneklerinde daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Yumurta ilavesiyle birlikte %5 ve 10 madımak tozu ile zenginleştirilmiş eriştelerin %100 buğday unuyla üretilen eriştelere benzer duyuşal özellikler gösterdiği daha yüksek oranlarda madımak tozu kullanımının duyuşal puanlarda azalmalara sebep olduğu belirlenmiştir.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

T.C.K.: Fikir/Kavram (Conceptualization), Metod (Methodology), Malzemeler (Resources), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Literatür Taraması (Investigation)
Yazı Yazan (Writing - Original Draft), **N.B.:** Tasarım ve Dizayn (Methodology), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H. Khouryieh, T. Herald, F. Aramouni, Quality and sensory properties of fresh egg noodles formulated with either total or partial replacement of egg substitutes, *Journal of Food Science*. 71(6) (2006), 433-S437. doi:10.1111/j.1750-3841.2006.00060.x
- [2] C. Alamprese, S. Iametti, M. Rossi, D. Bergonzi, Role of pasteurisation heat treatments on rheological and protein structural characteristics of fresh egg pasta, *European Food Research and Technology*. 221 (2005), 759-767. doi:10.1007/s00217-005-0024-z
- [3] J.M. Martin, J.E. Berg, A.M. Fischer, A.K. Jukanti, K.D. Kephart, G.D. Kushnak, ... P.L. Bruckner, Divergent selection for polyphenol oxidase and its influence on agronomic, milling, bread, and Chinese raw noodle quality traits, *Crop Science*. 45(1) (2005), 85-91. doi:10.2135/cropsci2005.0085a
- [4] C. F. Morris, Determinants of wheat noodle color, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 98(14) (2018), 5171-5180.
- [5] H. J. Moss, The quality of noodles prepared from the flours of some Australian wheat, *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 11(49) (1971), 243-247.
- [6] D. M. Miskelly, Flour components affecting paste and noodle colour, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 35(4) (1984), 463-471.
- [7] R.E. Asenstorfer, Y. Wang, D.J. Mares, Chemical structure of flavonoid compounds in wheat (*Triticum aestivum* L.) flour that contribute to the yellow colour of Asian alkaline noodles, *Journal of Cereal Science*. 43(1) (2006), 108-119. doi:10.1016/j.jcs.2005.09.001
- [8] G.Y. Wijaya, D.J. Mares, Apigenin di-C-glycosides (ACG) content and composition in grains of bread wheat (*Triticum aestivum*) and related species, *Journal of Cereal Science*. 56(2) (2012) 260-267. doi:10.1016/j.jcs.2012.06.007
- [9] M. Murray, A. L. Dordevic, L. Ryan, M. P. Bonham, An emerging trend in functional foods for the prevention of cardiovascular disease and diabetes: Marine algal polyphenols, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 58 (8) (2018), 1342-1358. doi: 10.1080/10408398.2016.1259209
- [10] N. Ertaş, M. Aslan, E. Yağcılar, The Effects of Kefir Culture and Instant Yeast Use on Boza Quality and Enrichment of Boza with Carrot Powders, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 1(2) (2019), 59-66.
- [11] J.M. Miranda, X. Anton, C. Redondo-Valbuena, P. Roca-Saavedra, J.A. Rodriguez, A. Lamas, A. Cepeda, Egg and egg-derived foods: effects on human health and use as functional foods, *Nutrients*. 7(1) (2015), 706-729. doi:10.3390/nu7010706
- [12] G. Dalbon, D. Grivon, M.A. Pagani, Continuous Manufacturing Process. In J. E. Kruger, R. B. Matsuo, J. W. Dick (Eds.), *Pasta and Noodle Technology*, St. Paul: American Association of Cereal Chemistsrty, 1996: ss. 13– 58.
- [13] S. Önde, H. Vurdu, Bitki çeşitliliği ve unutulmuş gen kaynakları, *Tabiat ve İnsan*. 22(2) (1988), 27-31.
- [14] T. Baytop, Therapy with medicinal plants in Turkey, *Past and Present*. 2 (1999), 348-349
- [15] H. Demir, Erzurum’da Yetişen Madımak, Yemlik ve Kızamık Bitkilerinin Bazı Kimyasal Bileşimi, *Bahçe*. 35(1-2) (2006), 55-60.
- [16] A. Tatlı, Important Range Plants of Erzurum Province, *Food and Agriculture Organisation of the*

- United Nations*, Rome, 1988, 43.
- [17] A. Yıldırım, A. Mavi, A.A. Kara, Antioxidant and antimicrobial activities of *Polygonum cognatum* Meissn. extracts, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 83(1) (2003), 64-69. doi:10.1002/jsfa.1288
- [18] M.K. Demir, M. Kılınc, Effect of honey powder substitution on cake quality, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 1(1) (2019), 53-58.
- [19] P.H. Davis, *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*, Vol 3, Edinburgh University Press, Edinburgh, 1967: ss. 280-289 .
- [20] B. Özkaya, H. Özkaya, E. Büyükkiz, The cooking properties of, Erişte"(Turkish noodles) produced by traditional methods, *Getreide Mehl und Brot*. 55 (2001), 120-125.
- [21] N.H. Oh, P.A. Seib, C.W. Deyoe, A.B. Ward, Noodles. I. Measuring the textural characteristics of cooked noodles, *Food Chemistry*. 60(6) (1983), 433-438.
- [22] H. Özkaya, B. Kahveci, Tahıl ve ürünleri analiz yöntemleri, *Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları*. 14 (1990), 118-120.
- [23] AACC, International, Method 66-50.01: pasta and noodle cooking quality-firmness. *Approved Methods of Analysis*. (2009).
- [24] AACC, *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. St. Paul, MN, USA: AACC Inc. 2000.
- [25] M.A. Gyamfi, M. Yonamine, Y. Aniya, Free-radical scavenging action of medicinal herbs from Ghana: *Thonningia sanguinea* on experimentally-induced liver injuries, *General Pharmacology: The Vascular System*. 32(6) (1999), 661-667. doi:10.1016/S0306-3623(98)00238-9
- [26] T. Beta, S. Nam, J.E. Dexter, H.D. Sapirstein, Phenolic content and antioxidant activity of pearled wheat and roller-milled fractions, *Cereal Chemistr*. 82(4) (2005), 390-393. doi:10.1094/CC-82-0390.
- [27] V. A. Yılmaz, Effects of different cooking and drying methods on phenolic acids, carotenoids, and antioxidant activity of emmer (*Triticum turgidum* ssp. dicocum) bulgur, *Cereal Chemistry*. 96(6) (2019), 1093-1102. doi:10.1002/cche.10219
- [28] R. Apak, K. Güclü, M. Özyürek, S.E. Celik, Mechanism of antioxidant capacity assays and the CUPRAC (cupric ion reducing antioxidant capacity) assay, *Microchimica Acta*. 160 (4) (2008), 413-419. doi:10.1007/s00604-007-0777-0.
- [29] D. Vitali, I.V. Dragojević, B. Šebečić, Effects of incorporation of integral raw materials and dietary fibre on the selected nutritional and functional properties of biscuits, *Food Chemistry*. 114(4) (2009), 1462-1469. doi:10.1016/j.foodchem.2008.11.032
- [30] M. Naczk, F. Shahidi, Extraction and analysis of phenolics in food, *Journal of Chromatography A*. 1054(1-2) (2004), 95-111. doi:10.1016/j.chroma.2004.08.059
- [31] G. Giuberti, A. Gallo, C. Cerioli, P. Fortunati, F. Masoero, Cooking quality and starch digestibility of glutenfree pasta using new bean flour, *Food Chemistry*. 175 (2015), 43-49. doi:10.1016/j.foodchem.2014.11.127
- [32] E. Aydin, D. Gocmen, Cooking quality and sensorial properties of noodle supplemented with oat flour, *Food Science and Biotechnology*. 20(2), (2011), 507-511. doi:10.1007/s10068-011-0070-1

- [33] T. Cankurtaran Kömürçü, Usage of primitive wheat (*Triticum monococcum* and *Triticum dicoccum*) flour and whole egg in noodle production, *Food Science and Technology International*. 29(5) (2023), 541-551. doi:10.1177/10820132231173020
- [34] C. Alamprese, The use of egg and egg products in pasta production, In *Egg innovations and strategies for improvements*, Academic Press. (2017) 251-259. doi:10.1016/B978-0-12-800879-9.00024-X
- [35] B. Demir, N. Bilgiçli, A. Elgün, M.K. Demir, Effects of chickpea flours and whole egg on selected properties of erişte, Turkish noodle, *Food Science and Technology Research*. 16(6) (2010), 557-564. doi:10.3136/fstr.16.557
- [36] C.F. Phelps, The physical properties of inulin solutions, *Biochemical Journal*. 95(1) (1965), 41.
- [37] F.A. Manthey, G.A. Hareland, D.J. Huseby, Soluble and insoluble dietary fiber content and composition in oat. *Cereal Chemistry*. 76(3) (1999), 417-420. doi:10.1094/CCHEM.1999.76.3.417
- [38] N. Aravind, M.J. Sissons, C.M. Fellows, J. Blazek, E.P. Gilbert, Effect of inulin soluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti, *Food Chemistry*. 132 (2) (2012), 993-1002. doi:10.1016/j.foodchem.2011.11.085
- [39] H.J. Chung, A. Cho, S.T. Lim, Effect of heat-moisture treatment for utilization of germinated brown rice in wheat noodle, *LWT- Food Science and Technology*. 47 (2) (2012), 342-347. doi:10.1016/j.lwt.2012.01.029
- [40] T.C. Kömürçü, N. Bilgiçli, Effect of germinated and heat-moisture treated ancient wheat on some quality attributes and bioactive components of noodles, *Food Chemistry*. 404 (2023), 134577. doi:10.1016/j.foodchem.2022.134577
- [41] C. Nimalaratne, N. Bandara, J. Wu, Purification and characterization of antioxidant peptides from enzymatically hydrolyzed chicken egg white, *Food Chemistry*. 188 (2015), 467-472. doi:10.1016/j.foodchem.2015.05.014
- [42] S. Benedé, E. Molina, Chicken egg proteins and derived peptides with antioxidant properties, *Foods*. 9(6) (2020), 735. doi:10.3390/foods9060735
- [43] B. İlerigiden, N. Ertaş, S. Türker, M. Aydın, V. Eyiz, A Research on Production of Simit with Sour Dough Method from Whole Wheat Flour, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 2(1) (2020), 1-11. doi:10.21448/ijsm.1280767
- [44] A. Hidalgo, C. Alamprese, A. Marti, S. Galli, A.B. Terno, A. Brandolini, Nutritional and technological properties of non-traditional Einkorn (*Triticum monococcum*) wheat pasta, *LWT- Food Science and Technology*. 133 (2020), 109932. doi:10.1016/j.lwt.2020.109932
- [45] I. Khan, A. Yousif, S.K. Johnson, S. Gamlath, S. Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta, *Food Research International*. 54(1) (2013), 578-586. doi:10.1016/j.foodres.2013.07.059.
- [46] D. Dziki, R. Różyło, U. Gawlik-Dziki, M. Świeca, Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds, *Trends in Food Science & Technology*. 40(1) (2014), 48-61. doi:10.1016/j.tifs.2014.07.010
- [47] S. Ragaei, I. Guzar, N. Dhull, K. Seetharaman, Effects of fiber addition on antioxidant capacity and nutritional quality of wheat bread, *LWT-Food Science and Technology*. 44(10) (2011), 2147-2153. doi:10.1016/j.lwt.2011.06.016

- [48] C. Fares, C. Platani, A. Baiano, V. Menga, Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat, *Food Chemistry*. 119 (3) (2010), 1023-1029. doi:10.1016/j.foodchem.2009.08.006

Uçucu Kül Katkısının Derin Karıştırma Kolonlarının Sıkışabilirliğine Etkisi

Yavuz YENGİNAR¹  Murat OLGUN² 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 14.11.2023

Kabul Tarihi: 08.02.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Derin karıştırma yöntemi,
Killi zemin,
Sıkışabilirlik,
Süper akışkanlaştırıcı,
Taguchi yöntemi,
Uçucu kül.

ÖZET

Sunulan bu çalışmanın özgün tarafı uçucu kül katkıli derin karıştırma kolonlarının (DKK) sıkışma kapasitesini en aza indirecek optimum enjeksiyon parametrelerini belirlemektir. Çalışmada killi bir zemin ıslak karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiştir. Zeminin likitlik indisi, su/bağlayıcı oranı, çimento oranı, süper akışkanlaştırıcı miktarı ve uçucu kül ikame oranı gibi değişkenlerin DKK'nın sıkışabilirlik özelliğine etkisi incelenmiştir. Deneilerin tasarımı Taguchi yöntemine göre yapılmıştır. 5 parametre ve 4 seviye için L16 ortogonal dizin tablosuna göre DKK numuneleri hazırlanmıştır. Kürde bekletilen (28 ve 56 gün) numunelerin konsolidasyon deneyleri yapılarak numunenin sıkışma indisi, kabarma indisi ve boşluk oranındaki değişim belirlenmiştir. Analizler sonunda parametrelerin optimum değerleri (zeminin likitlik indisi=0.4, su/bağlayıcı oranı=0.8, bağlayıcı dozajı=425 kg/m³, süper akışkanlaştırıcı oranı=%3, uçucu kül oranı=%40) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar DKK imalatında %40 oranında uçucu kül kullanılması ile enjeksiyon maliyetlerinin de bu oranda azalacağını göstermektedir. Ayrıca atık bir ürün olan uçucu kül kullanımının artması ile çevresel zararlar en aza inecektir.

Effect of Fly Ash Replacement on Compressibility of Deep Mixing Columns

Article Info

Article History

Received: 14.11.2023

Accepted: 08.02.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Clayey soil,
Compressibility,
Deep mixing method,
Fly ash,
Super plasticizer,
Taguchi method.

ABSTRACT

The unique aspect of this study is to determine the optimum injection parameters that will minimize the compression capacity of fly ash-containing deep mixing columns (DMC). In the study, a clayey soil was improved by wet mixing method. The effects of variables such as soil liquidity index, water/binder ratio, cement, superplasticizer and fly ash amounts on the compression properties of DMC were examined. The design of the experiments was made according to the Taguchi method. DMC samples were prepared according to the L16 orthogonal index table for 5 parameters and 4 levels. Consolidation experiments were performed on the samples kept in cure (28 and 56 days) and the change in the compression index, swelling index and void ratio of the sample was determined. At the end of the analyses, optimum values of the parameters (liquidity index of the soil = 0.4, water/binder ratio = 0.8, binder dosage = 425 kg/m³, superplasticizer ratio = 3%, fly ash ratio = 40%) were obtained. The results obtained show that by using 40% fly ash in DMC production, injection costs will also decrease at this rate. In addition, environmental damage will be minimized by increasing the use of fly ash, which is a waste product.

To cite this article:

Yenginar, Y. & Olgun, M. (2024). Uçucu kül katkısının derin karıştırma kolonlarının sıkışabilirliğine etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 139-152. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.38>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Yavuz Yenginar, yavuzyenginar@gmail.com



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

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geoteknik mühendisliği disiplininde herhangi bir yapının temas ettiği zeminde taşıma gücü, oturma, sıvılaşma, stabilite problemlerinden bir veya birkaç tanesinin bulunması halinde o zeminin uygun bir yöntemle stabilize edilmesi veya daha sağlam bir zeminle yer değiştirilmesi gerekmektedir. Problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde derin karıştırma yöntemi yaygın olarak kullanılan stabilizasyon yöntemlerinden bir tanesidir [1–3]. Bu yöntem ilk olarak 1975 yılında uygulanmaya başlanmış [4,5], bu tarihten itibaren ise arazi koşulları ve inşaat sektörünün gereksinimleri doğrultusunda farklı makine ekipmanları geliştirilmiştir. Derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirmesi ıslak ve kuru yöntem olarak uygulanabilmektedir. Kuru karıştırma yönteminde bağlayıcı madde (çimento, kireç vb.) kuru halde zemine püskürtülmekte ve karıştırılmaktadır. Islak derin karıştırma yönteminde ise bağlayıcı malzeme ile hazırlanan enjeksiyon zeminle mekanik olarak karıştırılmaktadır. Karıştırma işlemi, delgi gövdesi ucuna bağlı olan belirli bir çaptaki karıştırma bıçağının ucundaki püskürtme memelerinden enjeksiyonun yüksek basınçla (300-600 bar) püskürtülmesi ve delgi gövdesinin aşağı/yukarı hareketiyle eş zamanlı dönmesi ile devam etmektedir. Karıştırma işlemi sonunda zemine göre rijitliği daha fazla olan kolonlar imal edilmiş olmaktadır. Derin karıştırma yöntemi çakıllı zeminler hariç tüm zemin cinslerinde uygulanabilmektedir [6]. Bu yöntem ile iyileştirilmiş zeminin dayanımı artmakta, sıkışabilirliği ve geçirimsizliği azalmaktadır. Derin karıştırma kolonları (DKK) sızdırmazlık perdesi oluşturmak [7], derin kazıların desteklenmesi [8], sıvılaşabilir zeminlerin iyileştirilmesi [9] ve şev stabilitesinin artırılması [10,11] amacıyla kullanılmaktadır.

DKK'nın dayanım, sıkışma ve geçirimsizlik gibi özellikleri enjeksiyon parametrelerine (bağlayıcı dozajı, su/bağlayıcı oranı), imalat parametrelerine (delgi gövdesinin batma, çekme ve dönme hızları) ve zemin özelliklerine (zemin cinsi, kıvamı, dayanımı vb.) göre değişiklik göstermektedir. Islak karıştırma yönteminde bağlayıcı olarak genellikle çimento kullanılmaktadır. Çimentolu DKK'nın performans özellikleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [12–20]. Genellikle bağlayıcı dozajı ve kür süresi ile dayanım artarken, su/bağlayıcı oranı arttıkça dayanım düşmektedir [2,21,22]. Fakat, çimentonun yaygın kullanımı nedeniyle doğal kaynaklar azalırken [23], çimento üretimi sırasında hem çok fazla enerji tüketilmekte hem de CO₂ gaz salınımı artmaktadır [24,25]. DKK imalatında çimento yerine atık/yan ürün maddeler kullanılarak çevresel zararlar azaltılabilir.

Çimentolu DKK imalatında kısmi miktarda uçucu kül (UK) kullanıldığında; karışımın işlenebilirliği artmakta [26], dayanım artmakta [27], geçirimsizlik azalmakta [19,28], hidrasyon reaksiyonları uzun sürede gerçekleşmektedir [29]. Çimentolu DKK nihai dayanımının büyük çoğunluğunu 28 günde kazanırken, uçucu kül katkılı DKK'nın nihai dayanıma ulaşması daha uzun sürmektedir. Yine de yeterli miktarda uçucu kül kullanıldığında 28 günlük DKK dayanımı zemin stabilizasyonu için gerekli koşulları sağlamaktadır [30]. Zemin iyileştirme projelerinde DKK'nın tasarım dayanımı için genellikle 1 MPa yeterli olmaktadır [31]. Yenginar [20], 275 kg/m³ bağlayıcı dozajı ve %40 uçucu kül katkılı çimento DKK'nın dayanımını 28 günde 1.5 MPa elde etmiştir. DKK'nın performans özelliklerindeki iyileşme zemin-çimento-su karışımında meydana gelen kasyon değişimi ve hidrasyon reaksiyonlarının neticesinde olmaktadır [17].

Uçucu kül katkılı DKK kolonlarının dayanım özellikleri yeterince araştırılmasına rağmen DKK'nın sıkışabilirlik özelliğini araştırarak çalışmalar oldukça sınırlıdır. Uçucu kül katkılı DKK'nın sıkışabilirlik özelliği bilinirse düşey yükler altında kolondaki boşluk oranı değişimi ve oturma miktarı belirlenebilir. Bununla birlikte iyileştirilmiş zeminin (zemin-kolon kombinasyonu) sayısal çözümlerine (sonlu elemanlar yöntemi ile) olanak sağlayacak parametreler elde edilebilecektir. Bu çalışmada farklı kıvam özelliklerine sahip killi zeminler ile uçucu kül katkılı

çimento enjeksiyonları karıştırılarak DKK numuneleri hazırlanmış ve küre tabi tutulmuştur. İmalat sırasında zeminin likitlik indisi, bağlayıcı dozajı, su/bağlayıcı oranı, süper akışkanlaştırıcı oranı ve uçucu kül oranı değişken parametreler olarak seçilmiştir. Deneysel tasarım ve istatistiksel çalışmalar için Taguchi yöntemi ve S/N analizi kullanılmıştır. DKK numunelerinin 28 ve 56 gün sonunda konsolidasyon deneyleri yapılarak numunedeki boşluk oranı değişimleri ve sıkışma indisleri belirlenmiştir. Ayrıca minimum sıkışma özelliğine sahip DKK imalatı için imalat parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Malzemeler (Materials)

Çalışmada kullanılan zemin, Konya 2. Organize sanayi bölgesindeki bir araziden açık kazı usulü ile 6-7 m derinlikten temin edilmiştir. Zemin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine [32] göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Killi zeminin diğer geoteknik özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Zeminin geoteknik özellikleri

Özellik	Değer
Tane dağılımı	
Çakıl (%)	1.6
Kum (%)	10.8
Silt (%)	37.7
Kil (%)	49.9
Kıvam limitleri	
Likit limit (%)	52.1
Plastik limit (%)	22.7
Zemin sınıfı (USCS)	CH
Özgül yoğunluk	2.67

DKK numunelerinin hazırlanmasında ana bağlayıcı malzeme olarak CEM-1 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun priz başlangıç süresi 200 dk, priz bitiş süresi 240 dk ölçülmüştür. Çimentonun özgül yoğunluğu 3.2’dir.

DKK numunelerinin hazırlanmasında ikincil bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül (UK) kullanılmıştır. UK, Kütahya Seyitömer’de bulunan termik santralden temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal yapısında %54.49 SiO₂ (S), %20.58 Al₂O₃ (A) ve %9.27 Fe₂O₃ (F) bulunmaktadır. UK içerisindeki S+A+F=84.34% (>70%) ve CaO<%10 olduğundan dolayı, UK F sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmıştır [33]. Uçucu külün özgül yoğunluğu 2.13’dür.

UK katkılı enjeksiyonun vizkozitesini azaltmak amacıyla modifiye fosfonat bazlı süper akışkanlaştırıcı madde kullanılmıştır.

Taguchi yöntemi ve deney tasarımı (Taguchi design and experimental design)

Deneysel tasarım güçlü bir optimizasyon tekniği olan Taguchi yöntemine [34–37] göre yapılmıştır. Taguchi yöntemi süreç üzerinde etkili olan parametrelerin optimum seviyesini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir.

Bu çalışmada, minimum sıkışabilirliğe sahip UK katkılı DKK imalatı yapılabilmesi amaçlanmaktadır. Bahsedilen geoteknik probleme özgü olarak Taguchi yönteminin uygulanma aşamaları aşağıda kısaca anlatılmıştır.

- Parametre ve seviyelerinin belirlenmesi: DKK’nın sıkışma özelliği zemin ve enjeksiyon parametrelerine göre değişmektedir. İyileştirilmemiş zeminin likitlik indisi için plastik kıvam (LI=0.4)

ile likit kıvam (LI=1.0) arasında geniş bir aralık seçilmiştir. Doğal zeminin likitlik indisine (veya su muhtevası) göre enjeksiyondan gelen su DKK numunesinin toplam su/bağlayıcı oranını, dolayısıyla sıkışabilirlik özelliğini değiştirmektedir. Bu nedenle DKK numunelerinin sıkışabilirlik özellikleri belirlenirken farklı kıvamlardaki killi zeminler dikkate alınmıştır. Arazideki uygulamalarda bağlayıcı dozajı genellikle 100-500 kg/m³ arasında değişmektedir [38]. Birçok çalışmada optimum uçucu kül oranı %10 [39] ile %40 [19,20] arasında elde edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı için üretici firma %5 oranına kadar kullanılabilceğini bildirmiştir [40]. Su/bağlayıcı parametresinin alt sınırı Marsh hunisi deneyleri [41] ile belirlenmiş olup, enjeksiyonun rahatlıkla pompalanabilmesi için belirli bir viskoziteye sahip olması gerekmektedir [42]. Marsh hunisi deney sonuçları için Yenginar'ın [20] çalışmasına bakılabilir. Su/bağlayıcı oranının en fazla 1.4 olabileceği ifade edilmektedir [2,38,43]. Bu açıklamalar doğrultusunda enjeksiyon parametreleri için seçilen alt ve üst limitler; bağlayıcı dozajı (BD) için 200-425 kg/m³, UK ikame oranı (UKO) için %0-60, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı (S) için %0-5 ve su/bağlayıcı oranı (s/b) için 0.8-1.4 seçilmiştir.

• Ortogonal dizin seçimi: Deney tasarımında 5 parametre (BD, UKO, S, s/b, LI) bulunmaktadır. Her bir parametre için 4 seviye belirlenmiş ve deney tasarımı L16 (4⁵) ortogonal dizin tablosuna göre oluşturulmuştur (Tablo 2 ve Tablo 3).

Tablo 2. DKK imalatındaki değişkenler ve seviyeleri

Değişkenler	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3	Seviye-4
BD (kg/m ³)	200	275	350	425
UKO (%)	0	20	40	60
S (%)	0	1	3	5
s/b	0.8	1.0	1.2	1.4
LI	0.4	0.6	0.8	1.0

Tablo 3. L16 ortogonal dizin tablosu ile Taguchi deney tasarımı

Tasarım No	Parametre ve seviyeleri				
	BD (kg/m ³)	UKO (%)	S (%)	s/b	LI
1	200	0	0	0.8	0.4
2	200	20	1	1.0	0.6
3	200	40	3	1.2	0.8
4	200	60	5	1.4	1.0
5	275	0	1	1.2	1.0
6	275	20	0	1.4	0.8
7	275	40	5	0.8	0.6
8	275	60	3	1.0	0.4
9	350	0	3	1.4	0.6
10	350	20	5	1.2	0.4
11	350	40	0	1.0	1.0
12	350	60	1	0.8	0.8
13	425	0	5	1.0	0.8
14	425	20	3	0.8	1.0
15	425	40	1	1.4	0.4
16	425	60	0	1.2	0.6

• Deney ve analiz süreci: DKK numunesi hazırlandıktan belirli zaman sonra (28-56 gün) numunelerin sıkışma indisi (C_c) belirlenmiştir. Deney sonuçları S/N analizleri ile değerlendirilmiştir. S/N değeri Taguchi yöntemine özgü bir sonuç göstergesi olup, ortalamanın standart sapmaya oranı olarak tariflenmiştir. Çalışmada sonuç parametresinin (C_c) minimize edilmesi amaçlandığından “en küçük en iyi” durumuna karşılık gelen S/N formülü kullanılmıştır (Denklem 1).

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

Burada Y_i i. deneydeki sonucu ve n deney tekrar sayısını göstermektedir.

• Optimizasyon ve doğrulama: DKK'nın sıkışma özelliğini etkileyen tüm parametrelerin optimum seviyesi belirlendikten sonra, optimum parametreler ile tekrar DKK numunesi hazırlanmış ve optimizasyon sonuçları doğrulanmıştır.

Numune hazırlama (Sample preparation)

Araziden getirilen doğal zemin etüvde 60°C'de kurutulmuştur çünkü daha yüksek sıcaklıklarda (>100°C) kilin mineral yapısı değişebilmektedir [44]. Kil kurutulduktan sonra plastik tokmak ile dövülmüş, sonra 20 mm çaplı elekten elenerek zemin numunesi elde edilmiştir. DKK numuneleri hazırlanırken karışımda bulunan çimento, süper akışkanlaştırıcı katkı, uçucu kül, zemin ve suyun kütle ve hacimlerinin bilinmesi gerekmektedir. DKK numuneleri konsolidasyon ringi (50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde) içerisine yerleştirileceği için toplam karışım hacmi (V_T) bilinmektedir. V_T ile BD çarpılarak toplam kuru bağlayıcı miktarı (çimento+uçucu kül) (M_k) belirlenmiştir. M_k ile UKO çarpılarak UK kütlesi, dolayısıyla çimento kütlesi belirlenmiştir. M_k ile S ve s/b çarpımı sırasıyla süper akışkanlaştırıcı ve su kütlelerini vermektedir. Kütleleri belirlenen malzemeler için ilgili malzemenin yoğunluk bilgisi kullanılarak hacimleri hesaplanmıştır. Daha sonra toplam hacimden enjeksiyon hacmi çıkarılınca doğal (yaş) zemin hacmi bulunabilir. Zeminin likitlik indisine göre, her bir karışımdaki kuru zemin hacmi ve kütlesi hesaplanmaktadır. Tüm malzemelerin kütleleri belirlendikten sonra, malzemeler tartılarak karıştırma kabına dökülmüş ve mikser yardımıyla 10 dakika süresince karıştırılmıştır (Şekil 1a-1c). Hazırlanan karışım konsolidasyon ringlerine dökülmüş (Şekil 1d) ve sert zemine birkaç kez vurularak içerisindeki hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler poşetlenerek kür havuzuna bırakılmıştır. Numuneler 28 ve 56 gün kür edildikten sonra konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 1e). Konsolidasyon deneyleri ASTM D2435 standardına [45] uygun yapılmıştır. Deneylerde numune üzerine 50-100-200-400-800-1600 kPa gerilme (σ) uygulanmış (yükleme durumu), her yüklem kademesinde oturmalar bitene kadar beklenmiştir. Son yüklem kademesinden sonra numune üzerindeki gerilme 100 kPa'ya indirilmiş (boşaltma durumu) ve kabarma bitene kadar beklenmiştir. Numunelere ait kütle, hacim, eksenel boy kısalması, su muhtevası gibi değerler belirlendikten sonra her yüklem kademesinden sonra numunenin boşluk oranı (e) hesaplanmıştır. Deneyler sonunda konsolidasyon eğrileri (e-log σ) çizilerek sıkışma indisi (C_c), kabarma indisi (C_s) ve boşluk oranındaki değişim (Δe , $\Delta e/e$) değerleri belirlenmiştir. Sıkışma ve kabarma indisleri sırasıyla yüklem ve boşaltma eğrilerinin eğimi hesaplanarak (C_c , $C_s = \Delta e / \log \Delta \sigma$) bulunmuştur. Deformasyon modülü (M) ise gerilme-birim boy kısalma (σ - ϵ) eğrilerinden, $E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$ bağıntısı ile hesaplanmıştır.

BULGULAR (RESULTS)

Fiziksel Özellikler (Physical Properties)

DKK imalatı sırasında bağlayıcı dozajı, bağlayıcı faktörü, bağlayıcı içeriği, toplam su/bağlayıcı oranı ($W_T:W_B$), hacim oranı ve karışımın likitlik indisi değerleri bilinmelidir (Tablo 4). Bağlayıcı dozajı (α_{yerinde}); kuru bağlayıcı kütlelerinin karışım hacmine oranıdır. Bağlayıcı faktörü (α); kuru bağlayıcı kütlelerinin kuru zemin hacmine oranıdır. Bağlayıcı içeriği (a_w); kuru bağlayıcı kütlelerinin kuru zemin hacmine oranıdır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ($W_T:W_B$); karışımdaki toplam su kütlelerinin (enjeksiyon suyu ve doğal zemin suyu) kuru bağlayıcı kütlelerine oranıdır. Hacim oranı (VR); enjeksiyon hacminin iyileştirilmemiş zemin hacmine oranıdır. Karışımın likitlik indisi ($LI_{\text{karışım}}$), doğal zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisidir.

Numunelerin fiziksel özellikleri Tablo 4'de verilmiştir. α_{yerinde} ve α sırasıyla 200-425 kg/m³ ve 257-1760 kg/m³ arasında değişmektedir. a_w %18.7-128 arasında, VR %29-314 arasında, $W_T:W_B$ 1.48-3.22 arasında, $LI_{\text{karışım}}$ ise 0.55-1.57 arasında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 1. a) Karıştırma kabı, b) karıştırıcı, c) mikser, d) konsolidasyon deney numuneleri, e) konsolidasyon deney aleti

Tablo 4. Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Deney No	$\alpha_{\text{yerinde}} (\text{kg/m}^3)$	$\alpha (\text{kg/m}^3)$	$a_w (\%)$	$W_T:W_b$	VR (%)	$L_{\text{karışım}}$
1	200	257	18.7	2.67	29	0.55
2	200	274	21.3	2.88	37	0.83
3	200	294	24.4	3.05	47	1.19
4	200	318	28.5	3.22	59	1.57
5	275	473	42.4	2.43	72	1.45
6	275	528	43.7	2.43	92	1.52
7	275	414	32.2	2.04	51	0.88
8	275	454	33.0	2.06	65	1.01
9	350	896	69.6	1.97	156	1.50
10	350	790	57.4	1.81	126	1.29
11	350	675	60.6	1.86	93	1.48
12	350	609	50.4	1.69	74	1.10
13	425	1007	83.3	1.54	137	1.01
14	425	847	76.0	1.48	99	0.90
15	425	1760	128.0	1.67	314	1.46
16	425	1340	104.2	1.58	215	1.53

Zemin-enjeksiyon karışımlarına ait DKK numunelerinin hem kür öncesi hem de kür sonundaki su muhtevası ve yoğunluk değerleri ölçülmüştür. DKK numunelerinin yoğunluk değerleri kür öncesinde (taze karışım) $1.464\text{-}1.761 \text{ g/cm}^3$ ve kür sonunda (sertleşmiş karışım) $1.526\text{-}1.756 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. DKK numunelerinin kür sonundaki su muhtevası değerleri, karışımın likitlik indisine bağlı olarak kür öncesindeki duruma göre %2-20 oranında azalmaktadır (Tablo 5). Kür süresi boyunca DKK numunelerinin yoğunluğundaki artış ve su muhtevasındaki azalmanın iki tane sebebi bulunmaktadır. Birinci neden, likitlik indisi fazla olan karışımlarda priz başlangıç süresine kadar karışım

içerisindeki suyun bir miktarı dışarı sızmaktadır. İkinci neden ise priz başlangıcından kür sonuna kadar suyun bir kısmı hidratasyon (çimentolanma) tepkimelerinde kullanılmaktadır.

Tablo 5. DKK numunelerinin yoğunluk ve su muhtevası özellikleri

Tasarım numarası	Zemin ρ (g/cm ³)	Enjeksiyon ρ (g/cm ³)	DKK Numunesi			
			Kür başı		Kür bitimi	
			ρ (g/cm ³)	w (%)	ρ (g/cm ³)	w (%)
1	1.854	1.618	1.761	42.1	1.756	38.9
2	1.794	1.485	1.694	50.5	1.698	47.1
3	1.741	1.391	1.629	59.7	1.641	57.5
4	1.706	1.322	1.559	71.5	1.567	68.6
5	1.706	1.452	1.601	72.3	1.601	65.1
6	1.741	1.376	1.578	73.9	1.595	67.1
7	1.794	1.513	1.676	49.7	1.681	48.5
8	1.854	1.415	1.654	51.1	1.644	52.2
9	1.794	1.396	1.575	81.0	1.613	66.5
10	1.854	1.414	1.611	66.0	1.633	60.5
11	1.706	1.454	1.574	70.1	1.591	66.0
12	1.741	1.488	1.653	56.7	1.646	54.9
13	1.741	1.508	1.626	70.0	1.675	52.3
14	1.706	1.561	1.629	64.1	1.667	49.2
15	1.854	1.350	1.464	93.9	1.548	65.5
16	1.794	1.369	1.497	80.8	1.526	67.7

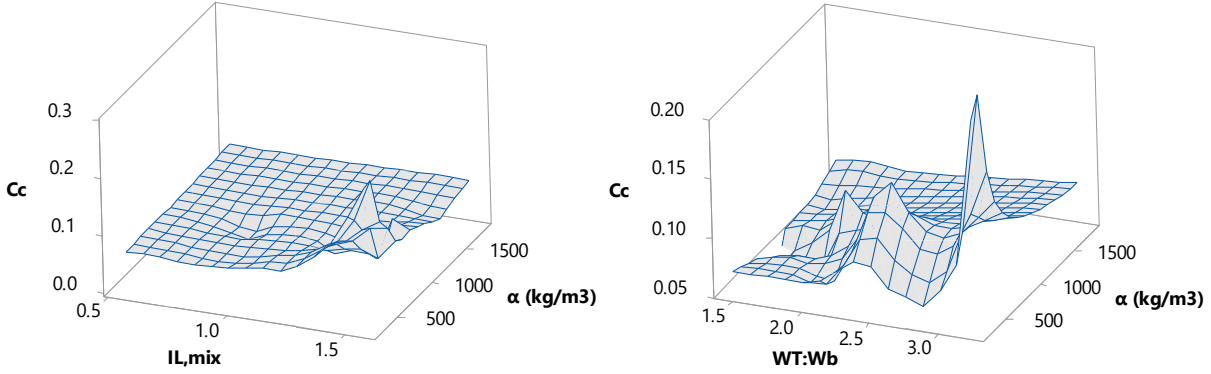
Konsolidasyon Parametreleri (Consolidation Parameters)

DKK numunelerinin konsolidasyon testleri ile boşluk oranı değişimi (Δe), sıkışma (C_c) ve kabarma indisleri (C_s), deformasyon modülü (M) gibi parametreler elde edilmiştir (Tablo 6). Sıkışma indisi en yüksek 4. tasarımda, en düşük ise 14. tasarımda elde edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde kür süresinin artmasıyla birlikte C_c , C_s , Δe ve $\Delta e/e$ değerleri azalırken, M değeri artmaktadır. Bu sonuç zamanla hidratasyon reaksiyonlarının devam ettiğini, DKK numunelerinin dayanım kazanmakla birlikte konsolidasyon parametrelerinde (oturma, sıkışabilirlik özelliklerinde) azalmanın, deformasyon direncinde artmanın olduğunu göstermektedir. İmalat parametrelerinin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisi bu sonuçlardan tam olarak anlaşılmamaktadır. Daha detaylı bir inceleme için deney sonuçları Taguchi yöntemine göre yorumlanacaktır.

Tablo 6. DKK numunelerinin konsolidasyon deneyi sonuçları

Tasarım No	28 günlük kür sonunda					56 günlük kür sonunda				
	C_c	C_s	Δe	$\Delta e/e$ (%)	M (MPa)	C_c	C_s	Δe	$\Delta e/e$ (%)	M (MPa)
1	0.077	0.022	0.080	6.9	22.6	0.067	0.014	0.072	6.0	27.1
2	0.063	0.013	0.059	4.4	20.4	0.075	0.006	0.042	3.1	23.5
3	0.112	0.016	0.080	5.3	16.0	0.063	0.015	0.070	4.7	28.1
4	0.457	0.027	0.251	13.5	5.8	0.266	0.018	0.120	6.6	10.0
5	0.119	0.020	0.110	5.6	13.4	0.116	0.011	0.100	5.2	16.4
6	0.166	0.016	0.123	6.6	12.3	0.082	0.015	0.064	4.4	18.9
7	0.058	0.018	0.062	4.5	28.7	0.045	0.015	0.060	2.8	36.9
8	0.079	0.018	0.075	5.6	21.9	0.059	0.018	0.058	4.4	28.3
9	0.124	0.024	0.160	8.4	13.2	0.110	0.018	0.110	5.8	17.3
10	0.046	0.015	0.073	4.8	32.7	0.045	0.010	0.067	4.1	37.3
11	0.061	0.015	0.076	4.5	25.4	0.055	0.013	0.062	3.6	31.9
12	0.068	0.018	0.096	7.5	23.0	0.051	0.014	0.054	4.0	36.3
13	0.091	0.026	0.119	7.2	17.3	0.071	0.014	0.088	5.6	25.9
14	0.045	0.016	0.091	4.2	33.4	0.042	0.012	0.059	5.8	48.7
15	0.080	0.028	0.293	13.6	19.5	0.054	0.014	0.067	5.9	33.9
16	0.062	0.018	0.073	5.1	24.2	0.059	0.013	0.068	3.6	30.7

DKK numunelerinde bağlayıcı faktörü arttırdığında C_c azalmaktadır (Şekil 2). Karışımdaki bağlayıcı faktörünün artması daha fazla çimentolanma ürününün oluştuğunu ve DKK performansının arttığını göstermektedir. Karışımın likitlik indisi (Şekil 2a) ve toplam su/bağlayıcı oranı (Şekil 2b) arttırdığında ise sıkışma indisi artmaktadır. Bunun sebebi karışım içerisindeki su miktarı arttığı için taneler arasındaki bağ zayıflamakta ve numunenin rijitliği azalmakta, konsolidasyon sırasında ise daha fazla sıkışmaktadır. Bir başka deyişle, karışımdaki su miktarının fazla olması daha boşluklu bir DKK yapısını gösterirken, bu numunelerden su çıkışı daha fazla olmaktadır.



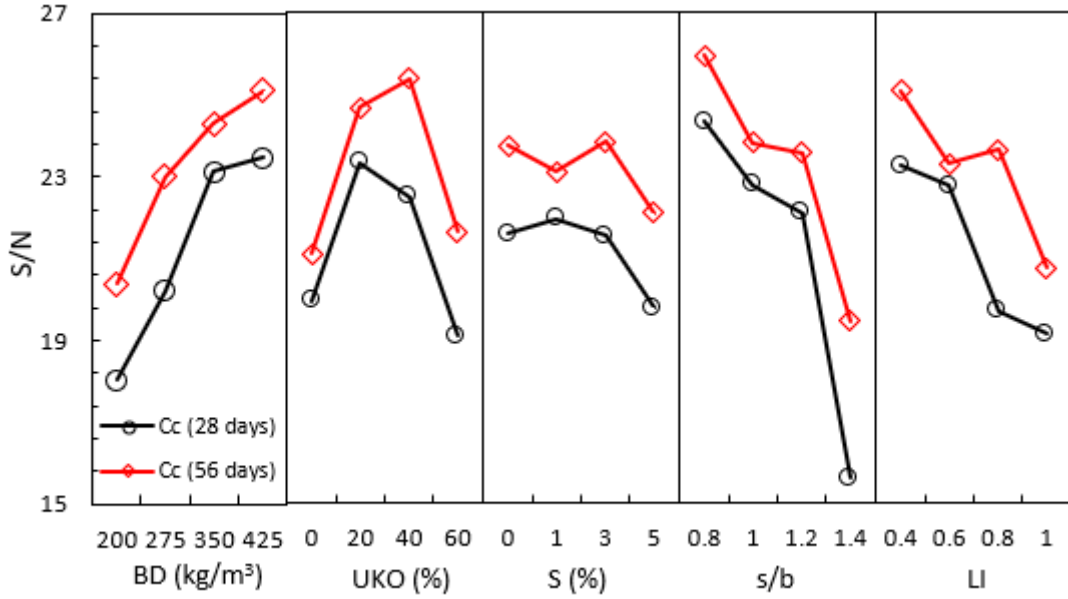
Şekil 2. Sıkışma indisinin DKK numunelerinin fiziksel özellikleriyle ilişkisi

İstatistiksel Analiz Sonuçları (Statistical Analysis Results)

S/N analizi (S/N analysis)

S/N analizinde her bir parametrenin sonuç üzerinde ne kadar etkili olduğu ve her parametrenin optimum seviyesi anlaşılabilir. Sıkışma indisi için S/N ana etki grafiği Şekil 3’de verilmiştir. 28 ve 56 gün kür sürelerinde bağlayıcı dozajı arttıkça sıkışma indisi azalmaktadır. Tüm kür sürelerinde su/bağlayıcı oranı ve zeminin likitlik indisi arttıkça sıkışma indisi azalmaktadır. Uçucu kül oranı 28 günde %20, 56 günde %40 oranına kadar sıkışma indisinin azalmasına sebep olurken, daha fazla kullanıldığında sıkışma indisini artırmaktadır. Bunun nedeni; kür süresine bağlı olarak uçucu kül oranı optimum seviyeyi geçtikten sonra performansın azalması veya sıkışabilirliğin artmasıdır. Uçucu kül tam manasıyla etkisini 56 günde göstermektedir. 28. günde %20, 56. günde %40 optimum oranın bulunması bunu desteklemektedir. Ayrıca çimento ana bağlayıcı iken, uçucu kül ikincil bağlayıcıdır. Yani önce çimento hidratasyonu daha sonra uçucu kül hidratasyonu gerçekleşmektedir. Kil-çimento-uçucu kül-su karışımında her malzemenin kimyasal bileşimi birbirinden farklıdır. Malzemelerin yapısında bulunan alüminyum, demir ve silisyum oksitlerin birbirleriyle bağ kurması ve belirli bir doyumluğa ulaşması malzemelerin oranlarıyla ilgilidir. Uçucu kül optimum seviyeyi geçtikten sonra (buna bağlı olarak çimento kütlesi azalmaktadır) hidrate olmayan uçucu kül taneleri numunenin sıkışabilirlik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. S/N analiz sonuçlarına göre 56 gün kür süresinde parametrelerin optimum seviyeleri; α yerinde için 425 kg/m³, UKO için %40, S için %3, s/b oranı için 0.8 ve LI için 0.4 belirlenmiştir.

Her parametrenin en küçük ve en büyük S/N değerleri arasındaki fark (delta değeri) ne kadar büyükse sonuç üzerinde o kadar etkilidir. Sıkışma indisi üzerinde en etkili parametre su/bağlayıcı oranı olmaktadır (delta=7.56). Diğer parametrelerin önem sırası; likitlik indisi (delta=3.84), bağlayıcı dozajı (delta=3.64), uçucu kül oranı (delta=2.41) ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (delta=1.84) şeklindedir. Sıkışma indisini etkileyen en önemli parametrelerin su/bağlayıcı oranı ve likitlik indisi olması, bu parametrelerin karışımın su içeriğini yani boşluk oranını etkilemesi yüzündendir. Karışımdaki boşluk oranı ne kadar fazla olursa DKK numunesi o kadar fazla sıkışabilmektedir.

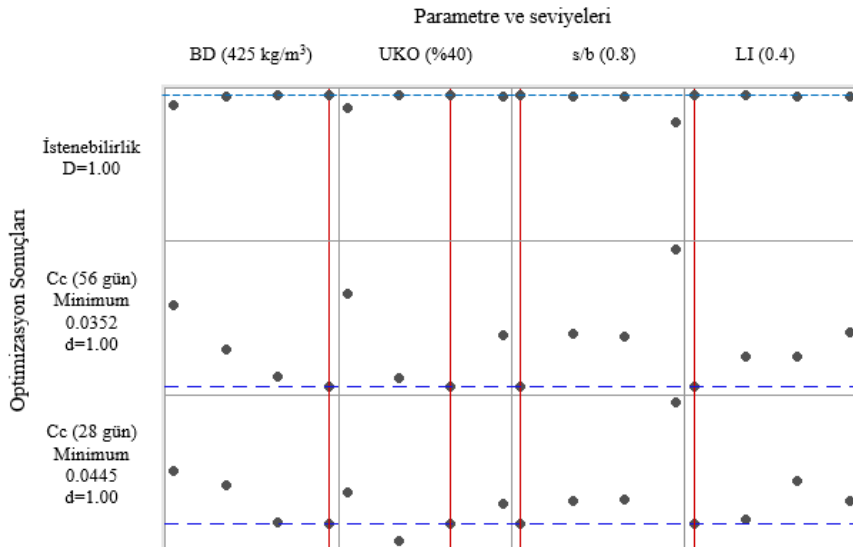


Şekil 3. S/N Ana Etki Grafikleri

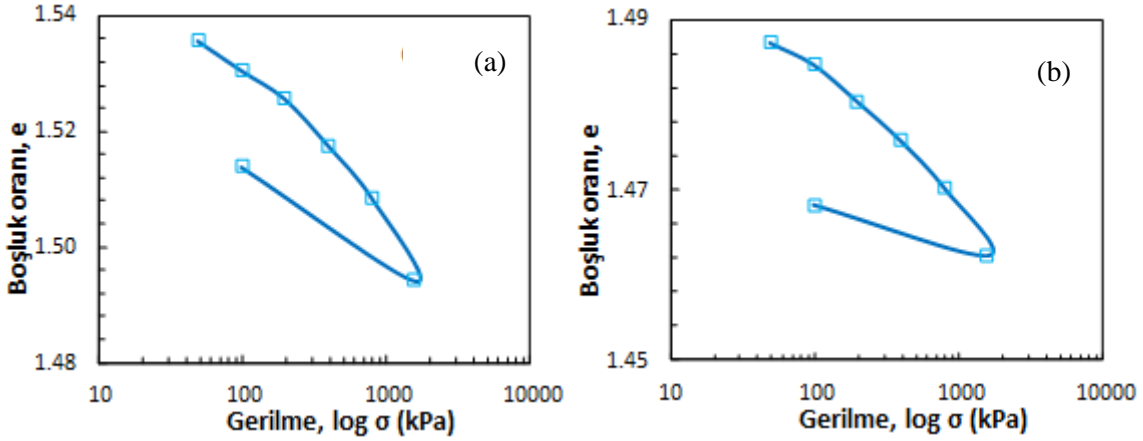
Optimizasyon ve Doğrulama (Optimization and Verification)

Optimum sıkışma indisi değerlerinin tahmin edilmesinde Minitab programı kullanılmıştır. Optimizasyon sırasında, sistemin serbestlik derecesini ayarlayabilmek için sonuç üzerinde etkisi en az olan parametre (süper akışkanlaştırıcı) modelden çıkarılmıştır. Optimizasyon sırasında 28 ve 56 günlük sıkışma indisi değerleri minimum elde edilmesi hedeflenmiştir. Optimizasyon sonucunda 28 ve 56 günlük sıkışma indisi değerleri sırasıyla 0.0445 ve 0.0352 tahmin edilmiştir. Ayrıca optimizasyon sonuçlarının İstenebilirlik değeri yani olma olasılığı 1.00 (%100) çıkmıştır (Şekil 4).

S/N analizinden elde edilen optimum parametre seviyeleri ile DKK numuneleri hazırlanmış ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır (Şekil 5). Doğrulama deneylerinde 28 günlük sıkışma indisi 0.044, 56 günlük sıkışma indisi 0.026 elde edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden bulunan sıkışma indisi değerleri optimizasyon sonuçlarına göre 28 günde %1.1, 56 günde %26.1 daha düşük elde edilmiştir. Doğrulama deneylerinden bulunan sıkışma indisi değerleri L16 tasarımındaki değerlerden daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuç optimizasyon sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Optimizasyon grafiği



Şekil 5. Konsolidasyon Doğrulama Deneyleri: a) 28 Gün, b) 56 Gün

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada uçucu kül katkısının derin karıştırma kolonlarının sıkışabilirlik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında killi bir zemin, ıslak karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Derin karıştırma kolonlarının imalatında en düşük sıkışma indisini elde etmek için optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı için 425 kg/m³, uçucu kül oranı için %40, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi için %3 ve su/bağlayıcı oranı için 0.8 belirlenmiştir.
- Bağlayıcı dozajı arttıkça kil taneleri arasında daha fazla çimentolanma ürünleri oluştuğundan DKK numunelerinin sıkışma indisi azalmaktadır. Enjeksiyonun su/bağlayıcı oranı arttıkça ise numunenin boşluk oranı artmakta ve DKK numunesinin sıkışma kapasitesi artmaktadır.
- Optimum imalat parametreleriyle DKK imalatı yapıldığında sıkışma indisi minimum seviyeye gelmektedir. Enjeksiyon içerisindeki uçucu kül miktarı toplam kuru bağlayıcının %40'ına kadar numunenin sıkışma indisini azaltmaktadır. Bu sonuç DKK imalatında çimento kullanımının %40 oranında azaltılmasıyla enjeksiyon maliyetlerinin azalacağını göstermektedir. Ayrıca atık bir ürün olan uçucu külün kullanımı artarak çevresel zararlar da azaltılmış olacaktır.

Sonuç olarak, optimum enjeksiyon parametreleri ile arazide düşük sıkışma indisine (sıkışabilirliğe) sahip derin karıştırma kolonları imal edilebilir. İnşaat sahasında çimento silosuna ek olarak uçucu kül silosu kurulabilir ve uygun oranlarda çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı ve su içeren enjeksiyon hazırlanarak kolon imalatı yapılabilir. Optimum imalat parametrelerinin arazinin zemin yapısına göre değişiklik gösterebileceği unutulmamalıdır

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Finansal destek (Funding)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 217M946 numaralı proje ile desteklenmektedir. Bu çalışma doktora tezinden üretilmiştir.

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

Y.Y.: Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Yazılım (Software), Malzemeler (Resources), Veri Toplama ve/veya İşleme (Data Curation), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Literatür Taraması (Investigation), Yazı Yazan (Writing - Original Draft), **M.O.:**

Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Larsson, M. Dahlström, B. Nilsson, Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 9 (2005), 1-15. doi:10.1680/grim.2005.9.1.1.
- [2] M. Kitazume, M. Terashi, The deep mixing method, *CRC press*, 2013.
- [3] EN 14679, Execution of special geotechnical works - Deep mixing, European Standard, 2005.
- [4] B.B. Broms, P. Boman, Lime stabilized column, içinde: *5th Asian Regional Conference on Soil Mech. and Found. Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1975*: ss. 227-234.
- [5] T. Okamura, M. Terashi, Deep lime mixing method of stabilization for marine clays, içinde: *5th Asian Regional Conference on Soil Mech. and Found. Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1975*: ss. 69-75.
- [6] J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Mengé, Construction Processes, içinde: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009*: ss. 3006-135. doi:10.3233/978-1-60750-031-5-3006
- [7] O. Helson, J. Eslami, A. Beaucour, A. Noumowe, P. Gotteland, Hydro-mechanical behaviour of soilcretes through a parametric laboratory study, *Construction and Building Materials*. 166 (2018), 657-667. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.177
- [8] P. Jamsawang, P. Voottipruex, P. Tanseng, P. Jongpradist, D.T. Bergado, Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation, *Acta Geotechnica*. 14 (2019), 225-246. doi:10.1007/s11440-018-0660-7
- [9] A. Hasheminezhad, H. Bahadori, Seismic response of shallow foundations over liquefiable soils improved by deep soil mixing columns, *Computers and Geotechnics*. 110 (2019), 251-273. doi:10.1016/j.compgeo.2019.02.019
- [10] C. Phutthananon, P. Jongpradist, D. Dias, P. Jamsawang, Numerical study of the deformation performance and failure mechanisms of TDM pile-supported embankments, *Transportation Geotechnics*. 30 (2021), 100623. doi:10.1016/j.trgeo.2021.100623
- [11] C. Phutthananon, P. Jongpradist, P. Jongpradist, D. Dias, P. Jamsawang, D.T. Bergado, Performance-based design optimization of embankments resting on soft soil improved with T-shaped and conventional DCM columns, *Acta Geotechnica*. 16 (2021), 3301-3326. doi:10.1007/s11440-021-01258-x
- [12] D.T. Bergado, G.A. Lorenzo, Economical mixing method for cement deep mixing, içinde: *Innovations in Grouting and Soil Improvement, 2005*: ss. 1-10. doi: 10.1061/40783(162)12
- [13] G.A. Lorenzo, D.T. Bergado, Fundamental parameters of cement-admixed clay—new approach, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130 (2004), 1042-1050. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042)
- [14] S. Horpibulsuk, N. Miura, T.S. Nagaraj, Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (2005), 187-192. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(187)
- [15] N. Miura, S. Horpibulsuk, T.S. Nagaraj, Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*. 41 (2001), 33-45. doi:10.3208/sandf.41.5_33
- [16] Y. Yenginar, İ. Özkan, Local site conditions and hydromechanical effects in service life of cantilever retaining walls, *Engineering Failure Analysis*. 153 (2023), 107536. doi:10.1016/j.engfailanal.2023.107536
- [17] Y. Yenginar, M. Olgun, Optimizing installation parameters of DM columns in clay using Taguchi method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 82 (2023), 145. doi:10.1007/s10064-023-03168-6

- [18] Y. Yenginar, M. Olgun, Optimizing construction parameters of DMC in high plasticity soils, içinde: *8th Geotechnical Symposium*, İstanbul, Turkey, 2019.
- [19] Y. Yenginar, A.A.A.M. Mobark, M. Olgun, Investigating the construction parameters of deep mixing columns in silty soils, *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 5 (2021), 464-474. doi:10.35860/iarej.978978
- [20] Y. Yenginar, Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*, 2020.
- [21] M. Kitazume, M. Grisolia, E. Leder, I.P. Marzano, A.A.S. Correia, P.J. V. Oliveira, H. Åhnberg, M. Andersson, Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method, *Soils and Foundations*. 55 (2015), 761-777. doi:10.1016/j.sandf.2015.06.009
- [22] M.T.M. Zulkifley, T.F. Ng, J.K. Raj, R. Hashim, A.F.A. Bakar, S. Paramanathan, M.A. Ashraf, A review of the stabilization of tropical lowland peats, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73 (2014), 733-746. doi:10.1007/s10064-013-0549-5
- [23] M. Kianimehr, P.T. Shourijeh, S.M. Binesh, A. Mohammadinia, A. Arulrajah, Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils, *Construction and Building Materials*. 227 (2019), 116792. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116792
- [24] H. Mujtaba, T. Aziz, K. Farooq, N. Sivakugan, B.M. Das, Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Geological Society of India*. 92 (2018), 357-362. doi:10.1007/s12594-018-1019-2
- [25] Y. Verma, B. Mazumdar, P. Ghosh, Dataset on the electrical energy consumption and its conservation in the cement manufacturing industry, *Data in Brief*. 28 (2020) 104967. doi:10.1016/j.dib.2019.104967
- [26] M.S. Deepak, S. Rohini, B.S. Harini, G.B.G. Ananthi, Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil, *Materials Today: Proceedings*. 37 (2021), 2014-2018. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.497
- [27] P. Jongpradist, N. Jumlongrach, Y. Sompote, S. Chucheeesakul, Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22 (2010), 49-58. doi:10.1061/ASCE0899-1561201022:149.
- [28] H.Y. Kek, Y. Pan, Y.C.H. Ng, F.H. Lee, An approach for modelling spatial variability in permeability of cement-admixed soil, *Acta Geotechnica*. 16 (2021), 4007-4026. doi:10.1007/s11440-021-01344-0
- [29] P. Hou, K. Wang, J. Qian, S. Kawashima, D. Kong, S.P. Shah, Effects of colloidal nanoSiO₂ on fly ash hydration, *Cement and Concrete Composites*. 34 (2012), 1095-1103. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.013
- [30] Y. Yenginar, Investigation of factors affecting the performance of deep mixing columns by model experiments, PhD Thesis, *Konya Technical University*, 2020.
- [31] FHWA, Federal highway administration design manual: Deep mixing for embankment and foundation support, *Report No. FHWA-HRT-13-046*, Federal Highway Administration, Washington, DC., 2013.
- [32] ASTM D2487, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), içinde: *Book of Standards Volume: 04.08*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. doi:10.1520/D2487-17E01
- [33] ASTM C618-23, Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, içinde: *Book of Standards Volume: 04.02*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
- [34] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, Taguchi's Quality Engineering Handbook, *John Wiley &*

- Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2004. doi:10.1002/9780470258354
- [35] G. Taguchi, S. Konishi, Taguchi methods orthogonal arrays and linear graphs: Tools for quality engineering, *American Supplier Institute*, 1987.
- [36] G. Taguchi, Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes, 4. bs, *Asian Productivity Organization*, Tokyo, 1988. doi:10.1002/qre.4680040216
- [37] G. Taguchi, E.A. Elsayed, T.C. Hsiang, Quality engineering in production systems, *McGraw-Hill*, New York, N.Y., 1989.
- [38] M. Topolnicki, In situ soil mixing, içinde: *Ground improvement*, 2013: ss. 377-378.
- [39] F. Zha, S. Liu, Y. Du, K. Cui, Behavior of expansive soils stabilized with fly ash, *Natural Hazards*. 47 (2008), 509-523. doi:10.1007/s11069-008-9236-4.
- [40] <https://uk.chryso.com/p/6906/chryso-optima-100>, CHRYSO®Optima 100, (2023).
- [41] ASTM D6910, Standard test method for Marsh funnel viscosity of construction slurries, içinde: *Book of Standards Volume: 04.09*, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2019. doi:10.1520/D6910_D6910M-09.
- [42] H. Güllü, M.M.D. Al Nuaimi, A. Aytek, Rheological and strength performances of cold-bonded geopolymer made from limestone dust and bottom ash for grouting and deep mixing, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80 (2021), 1103-1123. doi:10.1007/s10064-020-01998-2
- [43] M. Topolnicki, Design and execution practice of wet soil mixing in Poland, içinde: *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa, 2010: ss. 195-202.
- [44] Y. Gulgun, The effects of temperature on the characteristics of kaolinite and bentonite, *Scientific Research and Essays*. 6 (2011), 1928-1939. doi:10.5897/SRE10.727
- [45] ASTM D2435, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading, içinde: *Book of Standards Volume: 04.08*, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2020. doi:10.1520/D2435_D2435M-11R20

Montaj Sistemlerinde Tesis İçi Lojistik Kararları Altında Hat Yerleşim Stratejilerinin Karşılaştırılması

Pelin ŞAHİN¹  Ayşe KARAAĞAÇ¹  Esmâ SUNULU¹  Bilal ERVURAL² 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 04.01.2024

Kabul Tarihi: 12.02.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Hat yerleşim
Parça besleme,
Süpermarket,
Üretim lojistiği.

ÖZET

Üretim lojistiği olarak da bilinen iç lojistik, hammaddelerin, malzemelerin ve bileşenlerin sorunsuz bir şekilde yönetilmesi sürecinde kritik bir unsurdur. Tesis içi lojistiğin temel zorluklarından biri, depolama tesislerinin nasıl yapılandırılacağıdır. Bu karar, merkezi mi yoksa merkezi olmayan bir depolama sisteminin mi daha uygun olduğunu belirlemeyi ve belirli operasyonel ihtiyaçlara en uygun süpermarket türünün seçilmesini içerir. Taşıma sistemi kararları, denklemin bir sonraki ayrılmaz parçasını oluşturur. Bu adımda, besleme hatları, çekici trenler, forkliftler veya konveyör sistemleri ve Otomatik Kılavuzlu Araç (AGV) teknolojisinin kullanımı gibi malzeme taşıma yöntemleri üzerinde durulur. Bu çalışma, farklı istasyon yerleşim türleri (I-tipi, L-tipi, U-tipi ve S-tipi) süpermarket yerleşim yeri ve ulaşım araçlarının seçimi kararları ile analiz edilerek en uygun hat yerleşim türüne karar vermeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, toplam taşıma ve stok maliyetlerini en aza indirmeyi, tesis alanı kullanımını optimize etmeyi ve genel verimliliği artırmayı hedefleyen bir matematiksel model sunulmaktadır. Süpermarket yerleşimi düzeninin ve taşıma araçlarının türü ve sayısının optimize edilmesi, düşük maliyetli tesis içi taşımalara ve belirli bir hizmet kalitesi seviyesinin sağlanmasına yönelik önemli bir adımdır. Bu çalışma, süpermarket düzeni ve taşıma yöntemi seçimi kararları altında hat türlerinin karşılaştırılması ile tesis içi taşıma maliyetlerini en aza indirme, alan kullanımını ve verimliliği artırma odaklı bir yaklaşım sunmaktadır.

Comparison of Line Layout Strategies in Assembly Systems under In-Plant Logistics Decisions

Article Info

Article History

Received: 04.01.2024

Accepted: 12.02.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Line layout
Part feeding,
Production logistics,
Supermarket.

ABSTRACT

Internal logistics, interchangeably known as production logistics, plays a pivotal role in efficiently managing raw materials, materials, and components within a facility. A fundamental challenge in in-facility logistics lies in determining the configuration of storage facilities. This critical decision involves choosing between a centralized or decentralized storage system and selecting the most suitable supermarket type to meet specific operational needs. The subsequent integral step involves making decisions about the transportation system. This step evaluates various material handling methods, including feed lines, tow trains, forklifts, conveyor systems, and Automatic Guided Vehicle (AGV) technology. Building on this, our study aims to identify the most suitable line layout type by analyzing different station layout types (I-type, L-type, U-type, and S-type), supermarket layout, and transportation vehicle selection decisions. In this context, a mathematical model is designed to minimize total transportation and inventory costs, optimize facility space utilization, and enhance overall efficiency. Achieving an optimal supermarket layout and determining the appropriate type and quantity of transportation vehicles represents a crucial step towards realizing cost-effective in-facility transportation and ensuring a specific level of service quality. Our study provides a focused approach, aiming to minimize in-facility transportation costs, optimize space utilization, and enhance efficiency by systematically comparing line types within decisions related to supermarket layout and transportation method selection.

To cite this article: Şahin, P. Karaağaç, A. Sunulu, E. & Ervural, B. (2024). Montaj sistemlerinde tesis içi lojistik kararları altında hat yerleşim stratejilerinin karşılaştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 153-165. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.39>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Bilal Ervural, bervural@erbakan.edu.tr



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

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, özellikle montaj üretimi yapan işletmelerde, üretim hatlarının süreç iyileştirmesine odaklanmaktan parça lojistiği operasyonlarına ağırlık vermeye doğru kayda değer bir değişim yaşanmıştır [1]. Şirketler, en kaliteli ürünü en düşük maliyetle üretmek ve en iyi müşteri memnuniyetine sahip olmak için rekabet ederken [2], tüketici taleplerini karşılamak için çeşitli seçenekler sunarak ürünlerini özelleştirmek zorundadır. Bu durum, farklı ürün modellerinin üretilmesine ve istasyonlara tedarik edilecek parçaların önemli ölçüde çeşitlenmesine yol açmaktadır. Dahası, tam zamanında (Just-in-Time - JIT) konseptiyle uyumlu olarak, teslimat döngülerini en aza indirme zorunluluğu artmış ve aynı zamanda iyi organize edilmiş ve tutarlı lojistik operasyonlarına duyulan ihtiyacı yoğunlaştırmıştır [1,3,4].

Genellikle iç lojistik olarak adlandırılan üretim lojistiği, verimli üretim operasyonlarının temel bir bileşenidir ve hammaddelerin, malzemelerin ve bileşenlerin bitmiş ürünlere dönüştürülmesi sırasında düzenli bir şekilde yönetilmesi için kritik görev görür. Fabrika içi lojistiğin doğasında bulunan çok yönlü zorluklar arasında, depolama tesislerinin yapılandırılması önemli bir karar noktası olarak ortaya çıkmaktadır [5,6]. Bu karar, merkezi ve merkezi olmayan depolama sistemleri arasında mantıklı bir seçim yapılmasının yanı sıra belirli operasyonel gereksinimlere göre uyarlanmış en uygun süpermarket türünün seçilmesini de gerektirir. Buna paralel olarak, taşıma sistemi kararları da lojistik denklemin ayrılmaz bir parçasını oluşturur. Bu aşama, besleme hatları, traktör trenleri, forkliftler, konveyör sistemleri ve Otomatik Kılavuzlu Araçlar (Automatic Guided Vehicle-AGV) veya Lazer Kılavuzlu Araçlar (Laser Guided Vehicles-LGV) teknolojisinin entegrasyonu gibi seçenekleri kapsayan malzeme taşıma yöntemlerinin belirlenmesi ile sürdürülür.

Çapraz sevkiyatın tesis içi lojistikte karşılığı olan süpermarket kavramı stok yönetimine yardımcı olan ve bir üretim tesisi içindeki malzeme akışını düzenleyen bir depolama ve dağıtım sistemini ifade eder [5]. Parçaların kesintisiz tedarikini sağlamak için bu tesis içi lojistik alanlarının optimum konumunun ve miktarının belirlenmesi önemlidir. Tesis alanının yüksek maliyeti göz önüne alındığında, mevcut alanı stratejik olarak kullanmak, aşırı maliyetlere neden olan gereğinden büyük süpermarketlerden veya üretkenliği önemli ölçüde engelleyebilecek yetersiz süpermarketlerden kaçınmak zorunludur. Bunun yanı sıra, son yıllarda kablosuz ağlar, sensorlar ve akıllı bilgi ve üretim yöntemleri gibi teknolojilerin yükselişi etkili malzeme taşıma sistemlerinin geliştirilmesine yol açmış ve manuel taşıma işlemlerinin yerini alması için fırsat oluşturmuştur. Genel olarak Otomatik Taşıma Araçları (Automated Transport Vehicles-ATV) olarak adlandırılan AGV'ler, mobil robotlar, çekici trenler gibi araçlar günümüzde üretim istasyonları arasında malzeme taşıma için etkin bir şekilde kullanılmaktadır [7]. Etkili bir malzeme taşıma sistemi kurmak için birden çok malzeme taşıma aracını entegre bir halde kullanmak gerekebilir. Ancak, bu teknolojilerin edinilmesi ve uygulanması önemli ilk yatırım maliyetleri içerir ve birçok üretim tesisi için kayda değer bir engel teşkil eder. Bu zorlukların anlaşılması ve hafifletilmesi, uzun vadeli faydalar sağlayabilecek başarılı bir entegrasyon için çok önemlidir. Bu nedenle, otomatik taşıma araçlarının sisteme entegre edilmesi üretim endüstrileri için karmaşık karar problemlerinden biridir [1,8]. Alınacak kararlardan bazıları; (i) kullanılacak araç türünün ya da türlerinin belirlenmesi, (ii) araçların maksimum taşıma kapasitelerinin belirlenmesi ve (iii) malzeme yükleme ve boşaltma yönteminin belirlenmesidir.

İlgili literatür incelendiğinde belirli varsayımlar altında problemin bir kısmını ele alan teorik çalışmaların [9,10] çoğunlukta olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların birçoğu da taşıma aracının çizelgelemesi ve rotalaması üzerinedir. Heger ve Voss [11] çok amaçlı istasyonlardan

oluşan esnek bir atölye için AGV'lerin sevk kuralları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada AGV'ler için statik kurallar yerine dinamik öncelik temelli bir sevk politikası sunulmuş ve bu akıllı sevk yaklaşımı ile büyük bir iyileştirme sağlandığı vurgulanmıştır. Rahman ve Nielsen [12] dağıtım sistemleri için otomatik taşıma araçlarının (AGV, çekici tren, vb.) istasyonlara düzgün malzeme akışını sağlanması amacıyla bir çizelgeleme çalışması yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda araç türlerinin entegre şekilde çalıştığı bir yaklaşımın düzgün malzeme akışını sağladığı ve sistem performansının önemli ölçüde iyileştirildiği gösterilmiştir. Zacharia ve Xidias [13] esnek bir üretim sisteminde AGV filosu için araç rotalama ve hareket planlaması araştırmışlar ve çok amaçlı evrimsel bir model önermişlerdir.

Son yıllarda, problemi bütünsel olarak ele alan gerçek-hayat uygulamalarına ilişkin çalışmalara olan ilgi de artmaktadır. İlk olarak, Alnahhal ve Noche [14], karma modellenmiş montaj hatlarını besleyen süpermarketlerin sayısını ve yerlerini belirleyerek sistemin taşıma ve stok sabit maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan bir tamsayı programlama modeli ve genetik algoritma çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Nourmohammadi ve ark. [15] esnek imalat sistemleri için süpermarketlerin (tesis içi merkezi olmayan depolama alanları) konumunun belirlenmesi ve taşıma aracı seçimi problemini birlikte ele alan entegre bir stokastik model önermişlerdir. Battini vd. [8], tesis içi döngüsel sefer (milk-run) sistemlerinde, taşıma aracı seçim problemi ile süpermarket alanlarının konumunun belirlenmesi problemini birlikte ele almışlardır. Faccio vd. [16], karma modellenmiş üretim hatlarında optimal süpermarket ve taşıma/besleme sistemini tasarlamak için bir çerçeve sunmuşlardır. Bu çerçevede süpermarket sistemleri ile taşıma sisteminin optimal şekilde planlamasına yönelik hem uzun vadeli (statik-analitik model) hem de kısa vadeli model (dinamik-simülasyon modeli) entegre şekilde sunulmuştur.

Modern üretimin dinamik ortamında, iç lojistiğin etkin yönetimi, operasyonel verimlilik için giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu zorluğun merkezinde, tesis içindeki depolama alanlarının yapılandırılması ve taşıma sistemleriyle ilgili stratejik kararların verilmesi yer almaktadır. Bu bağlamda, yeni teknolojilerin entegrasyonu, bir dizi fırsat ve zorluğu da beraberinde getirmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve yatırımları geçerli kılmak için optimizasyon modelleri önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma, süpermarket konumu ve taşıma modu seçimine ilişkin kararlarla bağlantılı olarak çeşitli hat düzenlerinin, özellikle de I-tipi, L-tipi, U-tipi ve S-tipi stratejilerin incelenmesine dayanmaktadır. Genel amaç, tesis içi lojistiğin optimize edilmesi bağlamında en uygun hat yerleşim tipini belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için çalışma, toplam taşıma ve stok maliyetlerini en aza indirirken aynı zamanda tesis alanının kullanımını optimize etmek için geliştirilmiş bir matematiksel model içermektedir. Süpermarket yerleşim planının optimizasyonu ve uygun taşıma modu seçimi, yalnızca maliyet etkin fabrika içi taşımacılığın değil, aynı zamanda gerekli hizmet kalitesinin de elde edilmesinde çok önemlidir. Bu nedenle bu çalışma, tesis içi nakliye maliyetlerinin en aza indirilmesi ve alan kullanımı ile genel verimliliğin artırılması hedeflerine odaklanan, tesis içi lojistik problemlerin çözümüne yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu araştırma, süpermarket düzeni ve taşıma modu seçimi kararları altında hat düzeni türlerinin karşılaştırmalı bir analizini yaparak, modern üretim operasyonları alanında üretim lojistiğinin ortaya çıkardığı karmaşık zorluklar için çözüm sunmayı amaçlamaktadır.

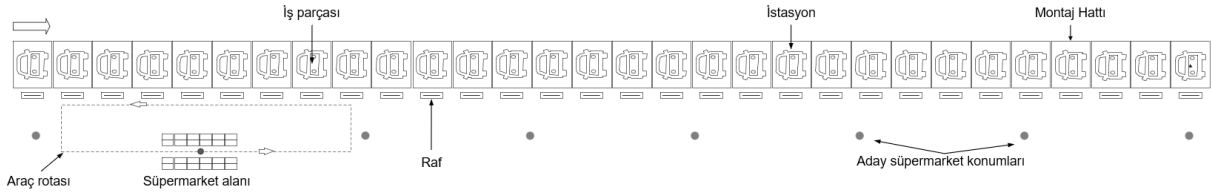
Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Ele alınan problemin tanımı ve geliştirilen matematiksel formülasyon Materyal ve Metot bölümünde açıklanmıştır. Örnek uygulamaya ilişkin bilgiler ve uygulama sonuçları Bulgular bölümünde sunulmuştur. Son olarak, çalışmanın genel sonuçları ve katkısı Tartışma ve Sonuçlar bölümünde verilmiştir.

MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Problemin Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışmada, otomotiv üretim hattında istasyonlara parça besleme politikasına bağlı olarak ortaya çıkan üretim lojistiği kararları ele alınmaktadır. Ele alınan parça besleme politikasına göre, parçalar önce büyük konteynerler içinde merkezi olmayan depolara (süpermarketler) gönderilir ve burada standartlaştırılmış kutularda yeniden paketlenir. Daha sonra, önceden belirlenmiş bir üretim planını takiben istasyonları düzenli olarak beslemek üzere kutular belirli taşıma araçlarına yüklenir. Bu amaçla, ilk olarak, süpermarketlerin optimum sayısı, konum ve büyüklük kararları ile birlikte belirlenmektedir. İkinci olarak, farklı taşıma araçlarının varlığı ve bunların kapasiteleri ile kurulum maliyetleri göz önünde bulundurularak, hazırlanan kutuları istasyonlara teslim etmek için her bir süpermarkette gerekli olan en uygun taşıma aracı türü ve sayısı hakkında karar verilmek istenmektedir.

Probleme ilişkin, istasyonlar, aday süpermarket pozisyonları, istasyonların beslediği süpermarket alanları ve parça kutularının istiflendiği istasyon raflarından oluşan tipik bir I-tipi (düz) hat düzeni Şekil 1'de gösterilmiştir.

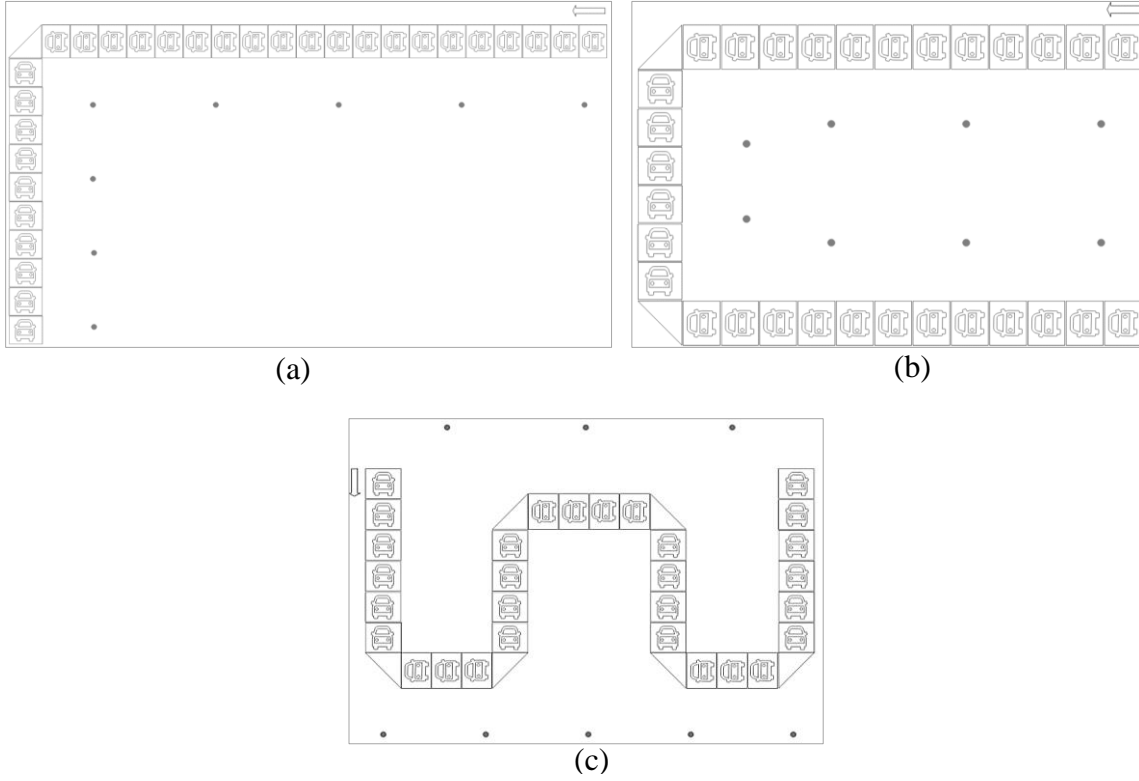


Şekil 1. Düz montaj hattı (I-tipi) yerleşim düzeni

Etkili hat konfigürasyonları, üretim tesislerindeki iç lojistiğin verimli şekilde ele alınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Her bir hat stratejisi farklı avantajlar ve dikkat edilmesi gereken hususlar içermektedir. Basit doğrusal düzeniyle öne çıkan I-tip (düz) hatlar, dönüşlerin uygulanabilir olmadığı kısa veya otomatik süreçler için idealdir ve hem malzemeler hem de operatörler için kolay erişim sağlar. Bununla birlikte, daha uzun I hatlarında, bina sınırlarına ulaşılması ve genel akışın engellenmesi gibi zorluklar ortaya çıkabilmektedir. Bununla birlikte, L-tipi hatlar ek bir köşeye sahip olsalar da genel olarak I-tipi hatlarla benzer özellikler taşımaktadırlar.

Buna karşılık yalnız üretimle özdeşleşen U-tipi hatlar, operatör yakınlığını ve hat dışından verimli malzeme tedarikini teşvik ederek manuel üretim hatlarında öne çıkmaktadır. Malzeme ikmali daha karmaşık olsa da, U-tipi hatlar çoklu operasyonları gerçekleştirmeyi ve daha hızlı sorun çözümünü kolaylaştırmaktadır. Diğer taraftan, S hattı otomotiv montaj hatları gibi uzun süreçlerde uygulama alanı bulmakta ve üretim tesislerine daha erişilebilir entegrasyon sağlamaktadır. S şeklindeki bu konfigürasyon lojistiği kolaylaştırır, ancak geçişlerin ve erişim noktalarının dikkatli bir şekilde planlanması şarttır. Hat yerleşim stratejileri [17–19] kaynaklarında ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Her bir hat konfigürasyonunun farklılıklarını kavramak, tesis içi lojistiği optimize etmek, sorunsuz malzeme akışı sağlamak ve çeşitli üretim ortamlarında genel operasyonel verimliliği artırmak için çok önemlidir. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada geliştirilen modelin farklı hat yerleşim stratejilerine uygulanması ile ele alınan problem hedefleri ile uyumlu şekilde en uygun hat yerleşim tipinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Şekil 2’de, L-tipi, U-tipi ve S-tipi hat yerleşim stratejileri gösterilmektedir.



Şekil 2. (a) L-tipi, (b) U-tipi ve (c) S-tipi hat yerleşim stratejileri

Verilen bilgilere dayanarak, problem, bir montaj hattı boyunca yerleştirilmiş bir dizi istasyonun $(k, l = 1, \dots, M)$ parça talebini karşılamak amacıyla bir dizi aday süpermarket $(s = 1, \dots, S)$ varsayılarak formüle edilebilir. Süpermarketler tarafından kutuları bir dizi istasyona teslim etmek için kullanılacak farklı tipte taşıma araçları $(e = 1, \dots, E)$ mevcuttur. Her taşıma aracının farklı kapasitesi, sevkiyat ve tedarik maliyetleri vardır. Hat üzerindeki k istasyonunun ve s süpermarketinin koordinatları sırasıyla (a_k, b_k) ve (A_s, B_s) ile tanımlanır. Bir taşıma aracının, süpermarket ile bir dizi istasyon arasında kat ettiği mesafe (d_{skl}) Eş. (1) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$d_{skl} = |A_s - a_k| + |B_s - b_k| + |A_s - a_l| + |B_s - b_l| + d_{kl} \quad (1)$$

Burada, mesafe (d_{skl}) temel olarak üç bileşenden oluşur: (i) s süpermarketinden k istasyonuna olan mesafe, (ii) l istasyonundan s süpermarketine olan mesafe ve (iii) k istasyonundan l istasyonuna olan mesafe (d_{kl}) . Bu kısımda, farklı hat yerleşim düzenleri için de doğru sonuç verebilmesi açısından istasyonlar arasındaki mesafe (d_{kl}) hesaplanırken doğrudan hat üzerindeki uzaklığın kullanıldığına dikkat edilmelidir. Nourmohammadi ve ark. [5] tarafından önerilen uzaklık formülü sadece düz hatlara uygulanabilirken, Eş. (1)'de önerdiğimiz denklem kullanılarak farklı hat yerleşim türleri için uzaklıklar hesaplanabilmektedir.

Problemin çözümünde aşağıda verilen varsayımlar dikkate alınmaktadır [5,6].

- Bir süpermarket tarafından hizmet verilen istasyonlar her zaman ardışıktır.
- Süpermarketlerin kapasitesi sınırlıdır ve bu durum, depolanabilecek ve geri alınabilecek kutu sayısı açısından önceden bilinmektedir.
- Farklı kapasitelere sahip farklı tipte taşıma araçları vardır. Süpermarketlerin her biri tarafından kullanılacak araç sayısı konusunda herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır.

- Bir süpermarketin mevcut taşıma araçları arasından yalnızca bir türünü kullanabileceği varsayılmaktadır.
- Tam otomatik yükleme ve boşaltma sistemlerinin kullanımını mümkün kılmak için, kutuların boyut açısından aynı olduğu kabul edilmiştir.
- Parçalar yeniden paketlenir ve istasyonlara teslim edilmek üzere süpermarketlerde aynı standart boyutlardaki kutularda depolanır. Bu çalışmada yalnızca süpermarketlerden montaj istasyonlarına küçük partiler halinde yapılan teslimatlar dikkate alınmıştır.

Matematiksel Formülasyon (Mathematical Formulation)

Süpermarket konumu/büyüklüğü ve taşıma aracı seçim problemi için önerilen karma tamsayı programlama modeli, verilen problem tanımına dayalı olarak sunulmuştur. Bu model, Nourmohammadi ve ark. [5] tarafından tanımlanan modelin genişletilmiş bir versiyonudur. Önerilen genişletilmiş modelde, kurulan süpermarket kapasitelerinin sabit bir değer yerine değişken olarak ele alınması modele dahil edilmiştir. Sonuç olarak, amaç fonksiyonunda süpermarket açma maliyeti, kurulan süpermarket kapasitesi ile birim kurulum maliyeti dikkate alınarak hesaplanacak şekilde değiştirilmiştir. Ayrıca, kurulabilecek süpermarket boyutunun maksimum değerini kısıtlamak için yeni bir kısıt getirilmiştir. Ayrıca, mevcut kısıtlar bu değişiklikleri hesaba katacak şekilde güncellenmiştir. Böylelikle model, farklı süpermarket konumları ve büyüklükleri ile taşıma aracı kararları dikkate alınarak, süpermarketleri kullanan istasyonların parça besleme sürecindeki iki ana karar problemini birlikte ele almaktadır.

Önerilen modelin parametreleri; istasyonların konumları, aday süpermarket konumları, istasyon talepleri, birim kurulum maliyeti, taşıma aracı ile ilgili maliyetler, taşıma aracı kapasitesi, mesafeler ve taşıma maliyetlerinden oluşur. Önerilen modelde kullanılan notasyonlar aşağıda açıklanmıştır.

İndisler

k, l	istasyon ($k, l = 1, \dots, M$)
s	süpermarket ($s = 1, \dots, S$)
e	taşıma araç tipi ($e = 1, \dots, E$)

Parametreler

a_k, b_k	k istasyonu için x ve y koordinatları
A_s, B_s	s aday süpermarketi için x ve y koordinatları
d_{skl}	süpermarket k 'den l 'ye kadar olan tüm istasyonlara ikmal yapmak için kat edilen toplam mesafe
st_k	kutu cinsinden k istasyonunun talebi
td_{kl}	k istasyonundan l istasyonuna kadar tüm istasyonların toplam talebi; $td_{kl} = \sum_{f=k}^l st_f$
H	maksimum süpermarket kapasitesi (kutu sayısı)
r	süpermarket kurulum maliyeti (birim başına)
q_e	e taşıma aracının kapasitesi (kutu sayısı)
p_e	e tipi bir taşıma aracı için satın alma maliyeti
c_e	taşıma aracı e kullanılarak bir kutuyu bir birim mesafeye taşımanın sevkியat birim maliyeti
T	maksimum kurulacak süpermarket sayısı

Karar Değişkenleri

w	kurulan süpermarket sayısı
y_{se}	süpermarket s 'ye atanan e tipi taşıma aracı sayısı
x_{skle}	istasyon k 'dan l 'ye kadar olan tüm istasyonlar e taşıma aracını kullanan süpermarket tarafından besleniyorsa, 1; aksi halde, 0.
v_s	kurulan süpermarket s 'nin kapasitesi

Önerilen bütünleşik üretim planlama ve sınıf temelli ürün atama modeli karışık tam sayılı programlama modeli olarak şu şekilde formüle edilmiştir.

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^M \sum_{l=k}^M \sum_{e=1}^E x_{skle} \times td_{kl} \times d_{skl} \times c_e + \sum_{s=1}^S \sum_{e=1}^E y_{se} \times p_e + \sum_{s=1}^S v_s \times r \quad (2)$$

Kısıtlar:

$$y_{se} \geq \sum_{k=1}^M \sum_{l=k}^M x_{skle} \times \frac{td_{kl}}{q_e} \quad \forall_s = 1, \dots, S; \forall_e = 1, \dots, E \quad (3)$$

$$w = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^M \sum_{l=k}^M \sum_{e=1}^E x_{skle} \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^b \sum_{e=1}^E x_{skbe} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=b+1}^M \sum_{e=1}^E x_{s(b+1)le} \quad \forall_b = 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{l=k}^M \sum_{e=1}^E x_{skle} \leq 1 \quad \forall_s = 1, \dots, S \quad (6)$$

$$td_{kl} x_{skle} \leq v_s \quad \forall_s = 1, \dots, S; \forall_e = 1, \dots, E; \forall_k = 1, \dots, M; \forall_l = k, \dots, M \quad (7)$$

$$1 \leq w \leq T \quad (8)$$

$$v_s \leq H \quad \forall_s = 1, \dots, S \quad (9)$$

$$x_{skle} \in \{0,1\} \quad \forall_s = 1, \dots, S; \forall_e = 1, \dots, E; \forall_k = 1, \dots, M; \forall_l = k, \dots, M \quad (10)$$

$$w, y_{se}, v_s \in \text{Tamsayı} \quad \forall_s = 1, \dots, S; \forall_e = 1, \dots, E$$

Modelde, Eş. (2) ile gösterilen amaç fonksiyonu süpermarketlerin toplam sevkiyat maliyeti, toplam araç tedarik maliyeti ve toplam kurulum maliyeti olmak üzere üç maliyet kaleminden oluşmakta ve toplam maliyeti en aza indirmeyi hedeflemektedir. Eş. (3) ile verilen kısıt, her bir süpermarkete atanan e tipi taşıma araçlarının sayısını elde etmektedir. Eş. (4) kısıtı kullanılarak, taşıma araçları ile beslenmek üzere belirlenen istasyon grubu sayısının, kurulan süpermarket sayısına eşit olması sağlanmaktadır. Eş. (5) kısıtı ile, tüm istasyonların atanan taşıma aracı tipi aracılığıyla yerleşik süpermarketler tarafından beslenmesi güvence altına alınmaktadır. Eş. (6) kısıtı kullanılarak, her istasyonun yalnızca bir süpermarket ve bir tür taşıma aracı tarafından beslendiği garanti edilmektedir. Eş. (7) ile, bir süpermarkete atanan istasyonların toplam talebinin süpermarketin kapasitesini aşmaması sağlanmaktadır. Eş. (8), kurulacak toplam süpermarket sayısının alt ve üst sınırlar arasında olması sağlanmaktadır. Eş. (9) ile, açılan bir süpermarketin kapasitesinin önceden belirlenen maksimum süpermarket kapasitesini aşmaması garanti edilmektedir. Eş. (10), hem ikili hem de tamsayı olan karar değişkenlerinin sınırlarını belirlemektedir.

BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde çalışmada önerilen metodolojinin geçerliliğini test etmek ve geliştirilen modelin performansını değerlendirmek amacıyla, Nourmohammadi ve ark. [5] tarafından önerilen test problemlerinden esinlenen bir örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Uygulama, otomotiv üretim hattında 30 istasyon ve 3 farklı taşıma aracını içermektedir. İstasyon talepleri Ekler kısmında, problemle ilgili diğer parametreler ise Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. Problem tanımına uygun olarak, istasyonların birbirlerinden bir birim uzaklıkta hat düzeni boyunca sırayla dizildiği varsayılmaktadır. Basitlik açısından, aday süpermarket konumlarının x-koordinatları (A_s) hat boyunca eşit aralıklarla dağıtılmaktadır. Ayrıca, istasyonların ve süpermarketlerin y-koordinatları (b_k ve B_s) arasında beşer birim mesafe olacak şekilde yerleştirilmektedir.

Tablo 1. Örnek problem için parametre değerleri

Parametre	Değer
İstasyon sayısı (M)	30
Olası süpermarket sayısı (S)	8
Taşıma aracı türü (E)	3
Maksimum süpermarket kapasitesi (H)	100
Süpermarket birim kurulum maliyeti (r)	10

Tablo 2. Taşıma aracı türleri için parametre değerleri

	1. tip araç	2. tip araç	3. tip araç
Kapasite (kutu cinsinden) (q_e)	10	30	50
Satın alma maliyeti (p_e)	100	500	2000
Birim taşıma maliyeti (c_e)	3	2	1

Önerilen karma tamsayılı programlama modeli CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Çözüm sürecinde, süpermarket sayısı, konumu ve büyüklüğü, her bir süpermarkete atanan taşıma aracı türü ve sayısı karar değişkenleri incelenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen çözüm, her bir istasyonun hangi süpermarketten beslendiği, kullanılan taşıma araçlarının tipi ve sayısı gibi bilgileri içermektedir.

Model ilk olarak, Şekil 1’de istasyon ve aday süpermarket konumları gösterilen I-tipi (düz) hat düzeni için çalıştırılmıştır. Tablo 3’te I-tipi yerleşim düzeni için optimal süpermarket konumları, kapasiteleri, her bir süpermarkette kullanılacak araç tipleri ve her bir istasyonun besleyeceği istasyon aralıkları sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, I-tipi hat yerleşim düzeni için 1,5 ve 6 numaralı aday süpermarketlerin açılmasına ve bu merkezi olmayan depolama noktalarında istasyonları beslemek için 3 numaralı araç türüne ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Tablo 3. I-tipi hat düzeni sonuçları

Süpermarket	Konum	Kapasite (v_s)	Atanan Araç Tipi	Beslenen İstasyon Aralığı
# 1	1	84	3	1 – 11
# 2	5	49	3	12 – 19
# 3	6	77	3	20 – 30

Bu çalışma, entegre tesis içi lojistik karar verme süreci için kapsamlı bir model sunmanın yanı sıra, üretim hatları için farklı hat yerleşim stratejilerini karşılaştırmayı ve en uygun olanı belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, I-tipi, S-tipi, L-tipi ve U-tipi hat yerleşim stratejileri, geliştirilen

matematiksel model kullanılarak sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Tablo 4'te özetlendiği gibi, L tipi hat düzeni kullanıldığında, sekiz aday konum arasından optimum süpermarket konumu olarak 2, 4 ve 8 belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, L tipi hat düzeni için istasyon hizmet dağılımı şu şekildedir: süpermarket-1 ilk 10 istasyona, süpermarket-2 11 ila 17. istasyonlara ve süpermarket-3 18 ila 30. istasyonlara hizmet vermektedir.

Benzer şekilde U-tipi hat yerleşim düzeni için üç süpermarket konumu belirlenmiştir. Optimal sonuçlara göre 2, 3 ve 8 numaralı aday pozisyonlara yerleştirilen süpermarketlerin kapasitelerinin de sırasıyla, 58, 97 ve 55 olduğu görülmektedir. Süpermarket-1 ve 3, 2 numaralı araç türünü kullanırken, süpermarket-2 ise 3 numaralı araç türünü kullanmaktadır. U-tipi hat yerleşim düzeni için model sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. Son olarak, önerilen matematiksel model kullanılarak S-tipi hat düzeni incelenmiştir. Tablo 6'da sunulan sonuçlara göre, 1,2 ve 3 numaralı aday süpermarketlerin açılmasına ve bu noktalardan istasyonları beslemek için 3 numaralı araç türüne ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Tablo 4. L-tipi hat düzeni sonuçları

Süpermarket	Konum	Kapasite (v_s)	Atanan Araç Tipi	Beslenen İstasyon Aralığı
# 1	2	74	3	1 – 10
# 2	4	50	3	11 – 17
# 3	8	86	3	18 – 30

Tablo 5. U-tipi hat düzeni sonuçları

Süpermarket	Konum	Kapasite (v_s)	Atanan Araç Tipi	Beslenen İstasyon Aralığı
# 1	2	58	2	1 – 8
# 2	3	97	3	9 – 22
# 3	8	55	2	23 – 30

Tablo 6. S-tipi hat düzeni sonuçları

Süpermarket	Konum	Kapasite (v_s)	Atanan Araç Tipi	Beslenen İstasyon Aralığı
# 1	1	92	3	1 – 12
# 2	2	28	2	13 – 15
# 3	3	90	3	16 – 30

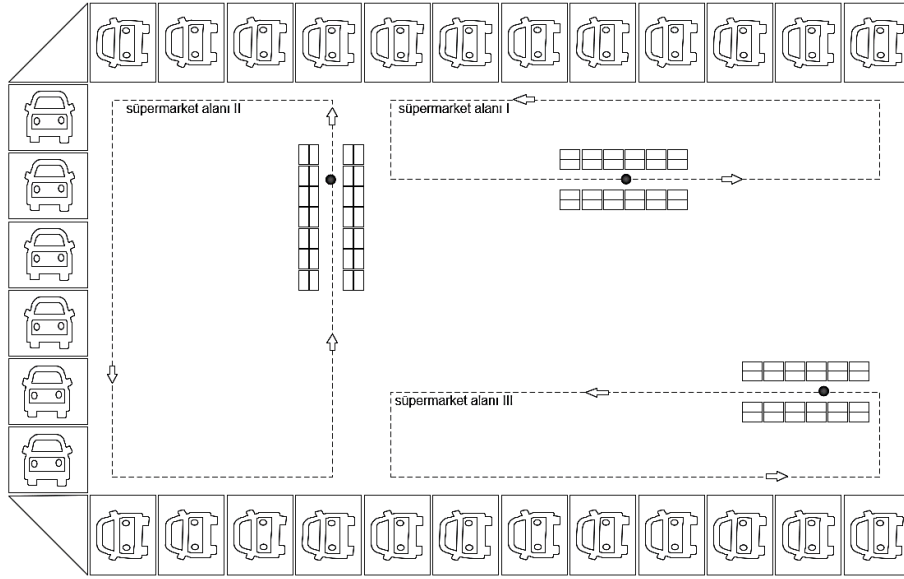
Tablo 7'de hat stratejilerinin karşılaştırılması amacıyla amaç fonksiyonu değerleri sunulmuştur. Açılan süpermarketlerin toplam taşıma maliyeti, toplam araç tedarik maliyeti ve toplam kurulum maliyeti kalemlerinden oluşan toplam maliyet değerleri karşılaştırıldığında en uygun stratejinin U-tipi yerleşim olduğu görülmektedir. U-tipi hat düzeni için elde edilen optimal yerleşim düzeni Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo 7. Yerleşim düzenlerinin karşılaştırılması

Hat yerleşim düzeni	Amaç Fonksiyonu
I-tipi	22,012
L-tipi	21,676
U-tipi	20,568
S-tip	20,968

Elde edilen sonuçlara göre, süpermarketler için optimal konumların ve büyüklüklerin belirlenmesi, her bir süpermarkete atanacak taşıma aracı türü ve sayısının optimize edilmesi, genel operasyonel verimliliği etkileyen unsurlar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Hat yerleşim stratejileri,

süpermarket operasyonlarının etkin bir şekilde yönetilmesine katkı sağlayarak, genel maliyetleri minimize etme ve operasyonel verimliliği artırma hedefine yönelik önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 3. U-tipi hat stratejisi için optimal yerleşim düzeni

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışma, üretim lojistiğinde önemli bir rol oynayan iç lojistik süreçlerinde, özellikle tesis içi lojistiğin temel unsurlarından biri olan depolama tesislerinin yapılandırılması ve malzeme taşıma yöntemlerinin seçimi konularında bir model sunmayı amaçlamıştır. Çalışma, süpermarketler için optimal konumların ve büyüklüklerin belirlenmesi ve malzeme taşıma araçları ile ilgili kararlar üzerinde odaklanarak en uygun hat yerleşim türünü belirlemeyi hedeflemiştir.

Matematiksel modelin uygulanmasıyla, özellikle otomotiv üretim hattında gerçekleştirilen bir örnek uygulama üzerinden elde edilen bulgularla önerilen yaklaşımın başarısı test edilmiştir. Uygulama sonuçlarına göre, farklı hat yerleşim stratejileri (I-tipi, L-tipi, U-tipi ve S-tipi) incelenerek, toplam taşıma ve yatırım maliyetlerini en aza indirmeyi, tesis alanı kullanımını optimize etmeyi ve genel verimliliği artırmayı hedefleyen en uygun hat yerleşim türü belirlenmiştir. Özellikle U-tipi hat yerleşim stratejisinin en uygun olduğu belirlenmiş, bu stratejiyle elde edilen optimal yerleşim düzeni, toplam taşıma maliyetleri, araç tedarik maliyetleri ve kurulum maliyetleri açısından en düşük maliyetli ve en verimli seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Sonuçlar, süpermarketlerin optimal konumlarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi, taşıma araçlarının türü ve sayısının optimize edilmesi konularının, tesis içi lojistikte genel operasyonel verimliliği etkileyen kritik unsurlar olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar, üretim tesislerinin iç lojistik süreçlerini daha etkin bir şekilde yönetmek, maliyetleri minimize etmek ve operasyonel verimliliği artırmak isteyen işletmelere değerli bir rehberlik sağlamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, artan problem boyutlarıyla uğraşırken daha etkili çözümler elde etmek için sezgisel bir yaklaşım [20,21] geliştirilebilir. Önerilen model, süpermarketlerin konumları belirlenirken merkezi depolama alanlarının yeri ve büyüklüğü ile ilgili kararlar dikkate alınarak genişletilebilir. Ayrıca model, hat dengeleme, tedarik zinciri ağı tasarımı gibi diğer ilgili problemlerle de bütünlük hâle getirilebilir.

Teşekkür / Acknowledgements

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A projesi

kapsamında (Destek Numarası: 1919B012202397) desteklenmiştir.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

P.Ş.: Yazılım (Software), Veri Toplama ve/veya İşleme (Data Curation), Literatür Taraması (Investigation), Yazı Yazan (Writing-Original Draft), **A.K.:** Veri Toplama ve/veya İşleme (Data Curation), Literatür Taraması (Investigation), Yazı Yazan (Writing-Original Draft), **E.S.:** Literatür Taraması (Investigation), Yazı Yazan (Writing-Original Draft), **B.E.:** Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Yazılım (Software), Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Yazı Yazan (Writing-Original Draft), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Battini, N. Boysen, S. Emde, Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry, *Journal of Management Control*. 24 (2013) 209–217. doi:10.1007/s00187-012-0154-y.
- [2] B.C. Ervural, B. Ervural, Ö. Kabak, Evaluation of Flexible Manufacturing Systems Using a Hesitant Group Decision Making Approach, *Journal of Intelligent Systems*. 28 (2019) 245–258. doi:10.1515/jisys-2017-0065.
- [3] S.K. Usta, M.K. Oksuz, M.B. Durmusoglu, Design methodology for a hybrid part feeding system in lean-based assembly lines, *Assembly Automation*. 37 (2017) 84–102. doi:10.1108/AA-09-2016-114.
- [4] Ö.F. Yılmaz, An integrated bi-objective U-shaped assembly line balancing and parts feeding problem: optimization model and exact solution method, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. 90 (2022) 679–696. doi:10.1007/s10472-020-09718-y.
- [5] A. Nourmohammadi, H. Eskandari, M. Fathi, A.H.C. Ng, Integrated locating in-house logistics areas and transport vehicles selection problem in assembly lines, *International Journal of Production Research*. 59 (2021) 598–616. doi:10.1080/00207543.2019.1701207.
- [6] S. Emde, N. Boysen, Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-model assembly lines, *International Journal of Production Economics*. 135 (2012) 393–402. doi:10.1016/j.ijpe.2011.07.022.
- [7] S. Emde, M. Gendreau, Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines, *European Journal of Operational Research*. 260 (2017) 255–267. doi:10.1016/J.EJOR.2016.12.012.
- [8] D. Battini, M. Gamberi, A. Persona, F. Sgarbossa, Part-feeding with supermarket in assembly systems: transportation mode selection model and multi-scenario analysis, *Assembly Automation*. 35 (2015) 149–159. doi:10.1108/AA-06-2014-053.
- [9] B.-H. Zhou, F. Tan, A self-adaptive estimation of distribution algorithm with differential evolution strategy for supermarket location problem, *Neural Computing and Applications*. 32 (2020) 5791–5804. doi:10.1007/s00521-019-04052-9.
- [10] E.O. Adenipekun, V. Limère, N.A. Schmid, The impact of transportation optimisation on assembly line feeding, *Omega (United Kingdom)*. 107 (2022) 102544. doi:10.1016/j.omega.2021.102544.
- [11] J. Heger, T. Voss, Reducing mean tardiness in a flexible job shop containing AGVs with optimized combinations of sequencing and routing rules, *Procedia CIRP*. 81 (2019) 1136–1141. doi:10.1016/j.procir.2019.03.281.
- [12] H.F. Rahman, I. Nielsen, Scheduling automated transport vehicles for material distribution systems, *Applied Soft Computing*. 82 (2019) 105552. doi:10.1016/J.ASOC.2019.105552.
- [13] P.T. Zacharia, E.K. Xidias, AGV routing and motion planning in a flexible manufacturing system using a fuzzy-based genetic algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 109 (2020) 1801–1813. doi:10.1007/S00170-020-05755-3/FIGURES/13.
- [14] M. Alnahhal, B. Noche, A genetic algorithm for supermarket location problem, *Assembly Automation*. 35 (2015) 122–127. doi:10.1108/AA-02-2014-018.
- [15] A. Nourmohammadi, H. Eskandari, M. Fathi, Design of stochastic assembly lines considering line balancing and part feeding with supermarkets, *Engineering Optimization*. 51 (2019) 63–83.

doi:10.1080/0305215X.2018.1439944.

- [16] M. Faccio, M. Gamberi, A. Persona, A. Regattieri, F. Sgarbossa, Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using supermarket, kanbans and tow trains: a general framework, *Journal of Management Control*. 24 (2013) 187–208. doi:10.1007/s00187-013-0175-1.
- [17] J.A. Tompkins, J.A. White, Y.A. Bozer, J. Tanchoco, Facilities Planning, 4. baskı, *John Wiley & Sons*, 2010. <https://www.wiley.com/en-gb/Facilities+Planning%2C+4th+Edition-p-9780470444047> (erişim 26 Ocak 2024).
- [18] J. Miltenburg, U-shaped production lines: A review of theory and practice, *International Journal of Production Economics*. 70 (2001) 201–214. doi:10.1016/S0925-5273(00)00064-5.
- [19] Q. Liu, J. Leng, D. Yan, D. Zhang, L. Wei, A. Yu, R. Zhao, H. Zhang, X. Chen, Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system, *Journal of Manufacturing Systems*. 58 (2021) 52–64. doi:10.1016/J.JMSY.2020.04.012.
- [20] M. Karakoyun, A. Özkış, Transfer Fonksiyonları Kullanarak İkili Güve-Alev Optimizasyonu Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Performanslarının Karşılaştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 3 (2021) 1–10.
- [21] A. Pektaş, O. İnan, Ağaç Tohum Algoritmasının Kümeleme Problemlerine Uygulanması TT - Application of Tree Seed Algorithm on Clustering Problems, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 4 (2022) 1–10.

Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasının P-Medyan Problemlerine Uygulanması

Gülşen ORUCOVA BÜYÜKÖZ¹  Hüseyin HAKLI² 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü,
Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 14.10.2023

Kabul Tarihi: 12.02.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Gri Kurt optimizasyon algoritması,

NP-Zor,

P-medyan problemi,

Tekdüze çaprazlama.

Bu çalışmada Np-zor problem sınıfından olan P-Medyan problemi Gri Kurt Optimizasyon (GKO) algoritması ile çözülmeye çalışıldı. GKO algoritmasının sürekli arama uzayı için önerilmesi nedeniyle kombinatoriyal yapıya sahip olan P-Medyan problemine doğrudan bu algoritmanın uygulanması mümkün değildir. Bu sebeple GKO algoritmasının ayrılcı arama uzayında işlem yapabilecek şekilde uyarlanması gerekmektedir. Bu süreçte Diferansiyel Evrim Algoritmasının arama stratejisinden esinlenilerek GKO algoritması ile birlikte çaprazlama tekniği kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle tekdüze çaprazlama tekniğinden faydalanılmıştır. Daha sonra GKO algoritmasında bulunan ve iterasyona bağlı olarak değişen parametre dikkate alınarak adaptif tekdüze çaprazlama olarak adlandırığımız çaprazlama tekniği oluşturulmuştur. Önerilen bu algoritma 40 P-Medyan problemi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen çözümler karşılaştırıldığında adaptif çaprazlama tekniğinin 40 problemin tamamında tekdüze çaprazlama tekniğinden daha iyi sonuçlar verdiğini görülmüştür. Ayrıca iki çaprazlama tekniği kullanarak elde edilen sonuçların sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için çözümler arasındaki iyileştirme oranına bakılmıştır. Elde edilen oranlar 40 problemin hepsinde adaptif tekdüze çaprazlama tekniğinin, tekdüze çaprazlama tekniğinde elde edilen çözümleri önemli oranda iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Implementation of Grey Wolf Optimization Algorithm to P-Median Problems

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 14.10.2023

Accepted: 12.02.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Grey Wolf optimization algorithm,

NP-hard,

P-Median problem,

Uniform crossover.

In this study, the P-Median problem, which is in the Np-hard problem class, is tried to be solved with the Gray Wolf Optimization (GWO) algorithm. Since the GWO algorithm is proposed for continuous search space, it is not possible to directly apply this algorithm to the P-Median problem, which has a combinatorial structure. For this reason, the GWO algorithm needs to be adapted to operate in the discrete search space. In this process, inspired by the search strategy of the Differential Evolution Algorithm, the crossover technique was used together with the GWO algorithm. First, the uniform crossover technique was utilized in the study. Then, taking into account the parameter in the GWO algorithm, which varies depending on the iteration, a crossover technique called adaptive uniform crossover was created. This proposed algorithm is tested on 40 P-Median problems. When the solutions obtained are compared, it is seen that the adaptive crossover technique gives better results than the uniform crossover technique in all 40 problems. In addition, in order to compare the results obtained using the two crossover techniques numerically, the improvement ratio between the solutions was analyzed. The obtained ratios show that in all 40 problems, the adaptive uniform crossover technique significantly improves the solutions obtained with the uniform crossover technique.

To cite this article:

Orucova Büyüköz, G. & Haklı, H. (2024). Gri kurt optimizasyon algoritmasının P-medyan problemlerine uygulanması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 166-177.

<https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.40>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Gülşen Orucova Büyüköz, gorucova@erbakan.edu.tr



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

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda birçok mühendislik problemi optimizasyon [1], regresyon [2], derin öğrenme [3], yapay sinir ağları vb. gibi teknikler ile ele alınmaktadır. Çözümü polinomsal zamanda doğrulanamayan problemler sınıfı NP-zor olarak adlandırılmaktadır [4]. Bu problemlere örnek olarak sırt çantası problemi, 8 vezir problemi, çizelgeleme problemi, gezgin satıcı problemi, kapasiteli veya kapasitesiz tesis yerleştirme problemi verilebilir. Analitik olarak çözülemeyen veya çözümü çok maliyetli olan bu problemleri çözmek için meta-sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalarından bazıları Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması [5], Yapay Arı Kolonisi Algoritması [6], Ağaç Tohum Algoritması [7], Balina Optimizasyon algoritmasıdır [8].

Globalleşen ve tüketimin sürekli arttığı günümüzde tesis yeri seçimi önemli bir konudur. Tedarik zincirinde firma ve müşteriler arasındaki ilişkide müşterileri memnun etmek ve düşük maliyette hizmet verebilmek iki taraf açısından istenen bir durumdur. Tesislerdeki ürünlerin müşterilere en kısa yoldan, en uygun şekilde ulaştırılması ve toplam maliyetin minimum olması hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda ortaya çıkan kombinatoriyal ve NP-zor problemlerden biri P-Medyan problemidir. P-Medyan problemi n adet düğümünden oluşan bölgeye p adet tesisin yerleştirilmesi problemidir. Burada amaç bu yerleştirmenin minimum maliyet olacak şekilde yapılması ve hangi talep noktasının hangi tesisten hizmet alacağını belirlemesidir. Minimum maliyet problemin amacına göre para, zaman, toplam mesafe olarak belirlenmektedir. P-Medyan problemlerine örnek olarak Kapasiteli Tesis Yeri Problemleri, Kapasitesiz Tesis Yeri Problemleri, Depo Yeri Belirleme Problemleri verilebilir.

P-Medyan problemi hakkında literatürde birçok araştırma bulunmaktadır. P-Medyan probleminin amaç fonksiyonu ve kısıtları M. Bastı tarafından [9] çalışmasında açıklanmıştır. Küçük boyutlu bir problem üzerinden amaç fonksiyonunun uygulanışı somut olarak anlatılmıştır. Ayrıca P-Medyan test problemlerinin hangi çalışmalarda kullanıldığına değinilmiştir. P-Medyan problemi OR-Kütüphanesi veri setleri için Diferansiyel Evrim (DE) Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması, Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [10]. Tesis yeri belirleme problemlerine benzer olan Depo Yeri Belirleme Problemi Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama (Mixed-integer linear programming) olarak modellenmiştir [11]. Bu model küçük boyutlu veri seti için ağırlıklı K-Ortalama (K-Means) algoritması ve orta boyutlu veri seti için (240'dan 399'a kadar) çözülmüştür. Karma tam sayılı doğrusal programlama tabanlı dinamik iteratif kısmi optimizasyon algoritması düzelt ve optimize et (fix and optimize) sezgiselinin dinamik, tekrarlı kısmi optimizasyon olarak dizayn edilmesidir. Veri setleri "Clustering Basic Benchmark" sayfasından alınmış ve CPLEX ile optimum sonuçlar elde edilmiştir. Algoritmanın büyük boyutlu veri setleri için optimal çözüm vereceği garanti edilmemiştir. F. B. Özsoydan ve T. Saraç, Kapasitesiz Depo Yeri Belirleme Problemine Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasını uygulamıştır [12]. Kapasitesiz Tesis Yeri Problemi için Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (APSO) ve Sürekli Parçacık Sürü Optimizasyonu (SPSO) Yerel Arama (YA) algoritması ile birleştirilerek APSOYA ve SPSOYA algoritmaları türetilmiştir [13]. APSOYA ve SPSOYA algoritmaları APSO, SPSO, Genetik, Evrimsel Benzetimli Tavlama (Evolutionary Simulated Annealing- ESA) algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. OR-Kütüphanesinden alınan 15 veri setinin 12'si için APSOYA algoritmasının diğer 3 algoritmadan daha optimum sonuçlar verdiği görülmüştür. N. Özçakar ve M. Bastı P-Medyan problemi için PSO algoritmasını kullanmıştır [14]. OR-Kütüphanesinden alınan 40 problem veri seti için minimum hata ölçütüne göre 28'inde optimum sonuç elde edilmiştir. Galvao Problem Seti için minimum hata oranları dikkate alındığında 16 problemde 4'ünde optimum değere ulaşılmıştır. Kapasitesiz Tesis

Yeri Problemleri Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) algoritması ile çözülmeye çalışılmıştır [15]. OR-Kütüphanesinden alınan ve daha önce PSO ile çözülmüş olan 12 probleme KKO algoritması uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların hemen hemen aynı olduğu ancak KKO algoritması üzerinde değişiklikler yapılırsa daha etkili sonuçlar alınabileceği kanaatine varılmıştır. Kapasitesiz Depo Yeri Belirleme problemi İkili Sosyal Örümcek Algoritması (İSÖA) ile çözülmüştür [16]. İSÖA metodu Sosyal Örümcek Algoritmasının Sabit Arama Uzayından İkili Arama Uzayına 4 fonksiyon aracılığıyla taşınmasına dayanır. Bu çalışmada M* veri setleri kullanılmıştır. Sonuçlar Yerel Arama (YA), Tabu Arama (TA), Geliştirilmiş Dağılım Araması (GDA) ile karşılaştırılmıştır. Güve Alev algoritmasının ikili versiyonu transfer fonksiyonları yardımıyla elde edilmiş ve bu algoritma Kapasitesiz Tesis Yeri problemlerine uygulanmıştır [17].

Literatürde P-Medyan problemlerinin Gri Kurt Optimizasyon (GKO) algoritmasıyla kayda değer çözüme rastlanmamaktadır. Bu algoritma sürekli problemlere çözmek için önerilmiştir. Bu nedenle ayrık problemlerin çözümünde kullanmak için öncelikle ikili versiyonunun düzenlenmesi gerekmektedir.

MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

P-Medyan Problemleri (P-Median Problems)

P-Medyan problemi ilk olarak Hakimi tarafından modellenmiştir [18]. NP-zor sınıfından olduğu kanıtlanan P-Medyan probleminde n adet düğümden oluşan bölgeye p adet tesisin yerleştirilmesi istenmektedir [19]. Burada amaç bu yerleştirmenin minimum maliyet olacak şekilde yapılması ve hangi talep noktasının hangi tesisten hizmet alacağına belirlenmesidir. Kombinatoryal yapıya sahip bu problemin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$i, j = 1, 2, \dots, n \text{ olmak üzere}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = p \quad (4)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad (5)$$

Karar değişkenleri:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ müşterisi } j \text{ tesisine atanmış ise} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ noktasında bir tesis açılmış ise} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$$

Burada;

n = toplam talep noktası sayısı

w_i = i noktasındaki talep

d_{ij} = i noktası ile j noktası arasındaki en kısa mesafe

p = yerleştirilecek olan hizmet verecek tesis (medyan) sayısıdır.

Bu çalışmada kullanılacak olan problemler OR-Kütüphanesinden alınan 40 adet P-Medyan test verisinden oluşmaktadır (<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/pmedinfo.html>). Test verilerinde de bahsedildiği gibi test verilerinin mesafe matrisleri Floyd'un algoritması ile düzenlenmiştir. Bu algoritma yönlendirilmiş bir grafikteki her bir köşe çifti için en kısa yolları keşfetmek için kullanılan temel bir algoritmadır [20]. Tablo 1'de 40 test verisinin optimal sonuçları, toplam düğüm sayıları ve açılacak P adet tesis sayısı gösterilmiştir.

Tablo 1. P-Medyan test problemleri

Problem	Optimal	Düğüm Sayısı	P Sayısı
pmed1	5819	100	5
pmed2	4093		10
pmed3	4250		10
pmed4	3034		20
pmed5	1355		33
pmed6	7824	200	5
pmed7	5631		10
pmed8	4445		20
pmed9	2734		40
pmed10	1255		67
pmed11	7696	300	5
pmed12	6634		10
pmed13	4374		30
pmed14	2968		60
pmed15	1729		100
pmed16	8162	400	5
pmed17	6999		10
pmed18	4809		40
pmed19	2845		80
pmed20	1789		133
pmed21	9138	500	5
pmed22	8579		10
pmed23	4619		50
pmed24	2961		100
pmed25	1828		167
pmed26	9917	600	5
pmed27	8307		10
pmed28	4498		60
pmed29	3033		120
pmed30	1989		200
pmed31	10086	700	5
pmed32	9297		10
pmed33	4700		70
pmed34	3013		140
pmed35	10400		5
pmed36	9934	800	10
pmed37	5057		80
pmed38	11060		5
pmed39	9423	900	10
pmed40	5128		90

Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Grey Wolf Optimization Algorithm)

Gri Kurt Optimizasyon (GKO) algoritması 2014 yılında önerilmiştir. Popülasyon tabanlı olan bu algoritma gri kurtların avlanma esnasında gerçekleştirdikleri toplu davranışlardan

esinlenerek bu davranışların matematiksel modellenmesine dayanmaktadır [21]. Kurt sürüsünde gri kurtlar alfa (α), beta (β), delta (δ) ve omega (ω) olarak gruplandırılır ve bu kurtlar arasında hiyerarşi vardır. Alfa kurt grubu, lider bir türdür ve diğerleri onun kurallarına uyar. Beta kurt ise lider yardımcısıdır ve alınan kararlarda alfaya yardımcı olur. Hiyerarşi piramidinde betadan sonra delta gelir. Delta kurt grubu bölgenin sınırlarını gözetleyen izciler, sürünün güvenliğini sağlayan gözcüler, önceden alfa ya da betaya olan tecrübeli yaşlılar, avlanmada yardımcı olan avcılar, hasta ve yaralı kurtlara bakan bekçilerden oluşmaktadır. Sürüdeki iç çatışmaları önleyen hiyerarşi piramidinin en alt basamağında bulunan kurt grubu omegadır. GKO algoritması avını arama, çevreleme, saldırma ve avlama aşamalarından oluşmaktadır [21].

Gri Kurt Algoritmasının Aşamaları

1. Avı Çevreleme (Encircling Prey): Gri kurdun avını çevrelemesi matematiksel olarak aşağıdaki gibi modellenmektedir:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (6)$$

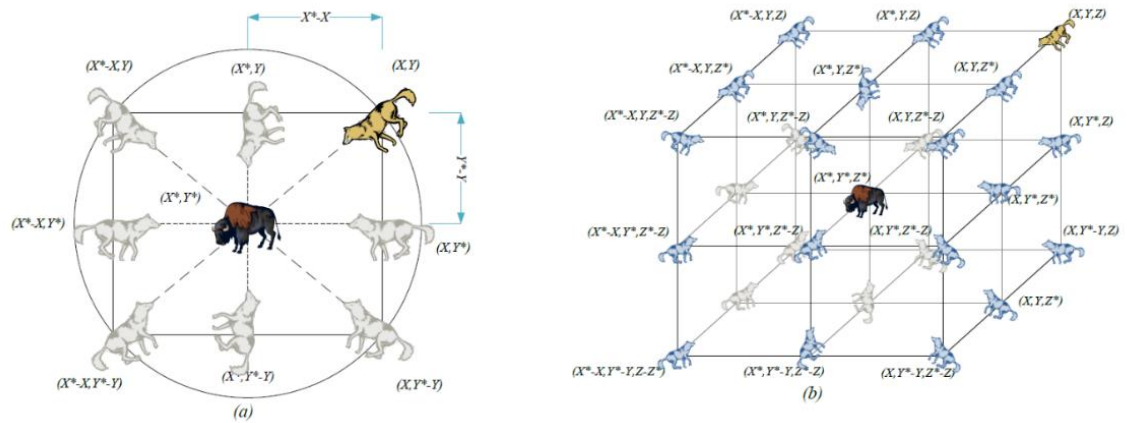
$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (7)$$

Burada mevcut iterasyon t , avın konum vektörü \vec{X}_p , bir gri kurdun konumu \vec{X} ile gösterilmiştir. \vec{A} ve \vec{C} katsayı vektörleri

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (8)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada \vec{a} iterasyon boyunca lineer olarak 2'den 0'a kadar azalmaktadır ve \vec{r}_1, \vec{r}_2 ise $[0,1]$ aralığında rastgele vektörlerdir. Şekil 1'de gösterildiği gibi gri kurdun 2D ve 3D uzayındaki noktalardan herhangi birine ulaşması mümkündür ve bu konumu denklem (6) ve (7)'ye göre ayarlayabilir. Bu uzaylar genişletilerek n boyuta taşınırsa gri kurtların bulunabilecek en iyi çözüm etrafında hareket etmesi sağlanmış olur [21].



Şekil 1. 2D ve 3D uzayında gri kurtların konum vektörleri ve muhtemel sonraki konumları [21]

2. Avlama (Hunting): Gri kurtlar avlanırken beta ve delta kurtları da bazen avlanmada bulunabilir. Ancak genellikle avlama alfanın önderliğinde gerçekleşir. Bu durumu matematiksel olarak modelleyebilmek için avın konumunu bulurken alfa, beta ve deltanın diğer kurtlardan daha iyi çözümler olduğu kabul edilir. Bu sebeple, elde edilen ilk üç en iyi çözüm kaydedilir ve diğer kurtların pozisyonları bu üç kurdun konumlarına göre güncellenir. Bu aşamada (10)-(12) denklemleri kullanılmaktadır [21].

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (10)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (11)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (12)$$

3. Ava Saldırma (Attacking Prey)

Gri kurtların avlamaları ava saldırarak sona erer. Bu yaklaşımın matematiksel olarak modellenmesinde \vec{a} değeri iterasyon boyunca 2'den 0'a doğru azalmaktadır. Dolayısıyla (8) denklemindeki \vec{A} 'nın değerlerdeki dalgalanma azaltılmış olur. \vec{A} , [-1,1] aralığında rastgele değer aldığı anda arama kurdunun bir sonraki konumu mevcut konumu ile avının konumu arasında bir yerde olur. Yani $|\vec{A}| < 1$ olması saldırma işleminin gerçekleştiğini gösterir.

4. Arama (Search for Prey)

\vec{A} 'nın alabileceği değerler için $|\vec{A}| > 1$ şartı sağlandığında gri kurtlar birbirlerinden uzaklaşır, farklı yerlere yönelerek av aramaya devam eder. Bu durum gri kurdun avından uzaklaşmasını ve daha iyi bir av aramasını sağlar. Böylece GKO algoritmasının global araştırma yeteneği gelişir. Şekil 2'de GKO algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.

```

Gri Kurt Popülasyonunun ilk atamasını yap  $X_i = (1, 2, \dots, n)$ ,  $a$ ,  $A$ ,  $C$  parametrelerini ata
Her bir ajanın uygunluk değerini hesapla
 $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  ve  $X_\delta$  değerlerini bul
 $X_\alpha$  = Popülasyondaki en iyi konuma sahip ajan
 $X_\beta$  = Popülasyondaki en iyi ikinci konuma sahip ajan
 $X_\delta$  = Popülasyondaki en iyi üçüncü konuma sahip ajan
while (t < Maksimum iterasyon sayısı)
  for Her bir ajan
    Mevcut arama ajanların konumlarını Denklem (12) ile güncelle.
  end for
   $\alpha$ ,  $A$  ve  $C$  parametrelerini güncelle
  Her bir ajanın uygunluk değerini hesapla
   $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  ve  $X_\delta$  parametrelerini güncelle
  t = t+1
end while
return  $X_\alpha$ 
    
```

Şekil 2. Gri kurt optimizasyon algoritmasının akış diyagramı [21]

Uygulama (Application)

P-Medyan problemleri kombinatoriyal olduğu için ayrık arama uzayında yer almaktadır. GKO algoritması ise sürekli bir yapıya sahiptir. Gri kurt algoritmasında Şekil 2'deki akış şemasında görüldüğü gibi gri kurtların pozisyonları atandıktan sonra en iyi 3 pozisyona sahip kurtlar α , β , ω kurtları olarak adlandırılmaktadır. Bu üç kurdun pozisyonu kullanılarak popülasyondaki diğer kurtların konumları (10)-(12) denklemleri yardımıyla lineer olarak güncellenmektedir. P-Medyan problemini çözmek için bu lineer güncelleme kısmında pozisyon iyileştirmesi için Diferansiyel Evrim algoritmasının arama stratejisinden esinlenilerek çaprazlama teknikleri kullanılmıştır. Çaprazlama tekniği olarak tek nokta, iki nokta, tekdüze (uniform) çaprazlama gibi birçok farklı çaprazlama teknikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada rastgele üretilen sayılara göre bireyin rastgele genlerinde değişime sebep olacağı için tekdüze çaprazlama kullanılmıştır.

Tekdüze (Uniform) Çaprazlama: Tekdüze çaprazlama tekniğinde seçilen bireyler için boyut kadar rassal sayı üretilir. Eğer rassal üretilen sayı 0.5'den büyük veya eşitse birey1 ve

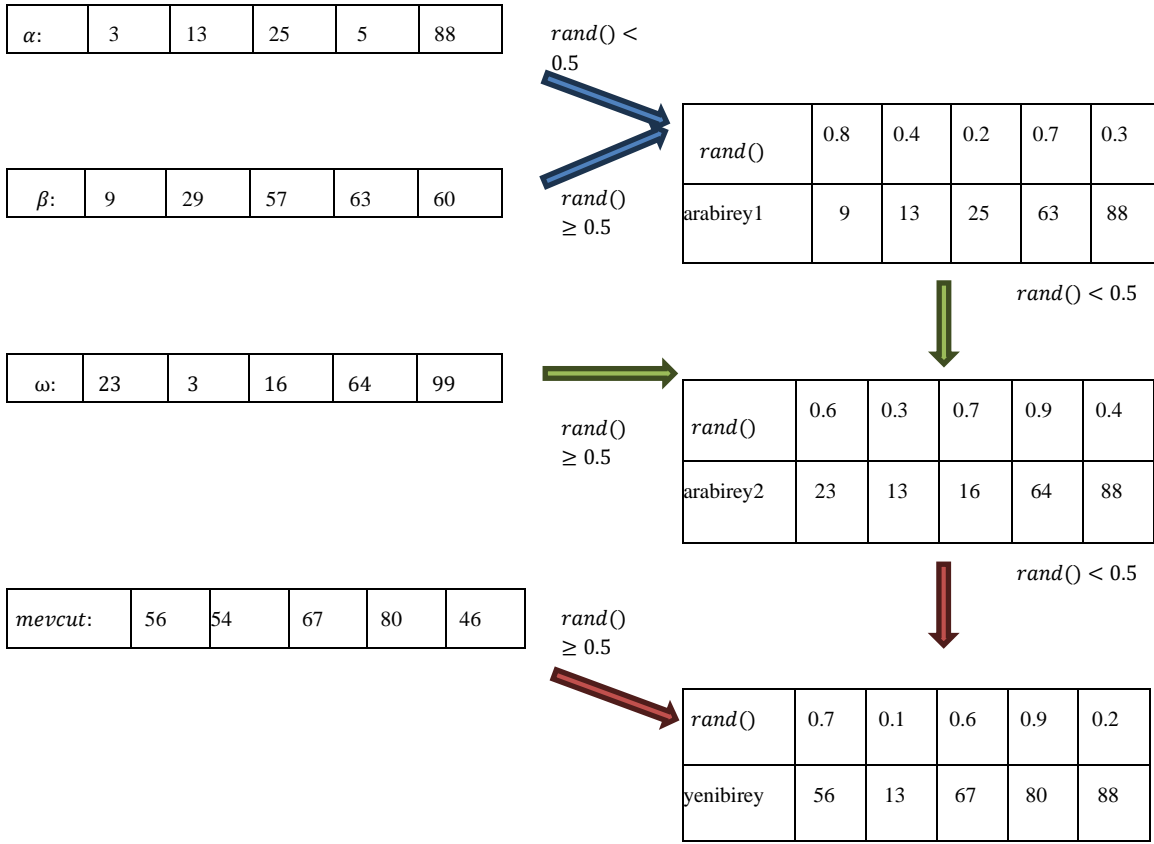
birey2'nin genleri yer değiştirir. Eğer küçük ise değişim olmaz.

Rassal sayılar: **0.2 0.8 0.1 0.3 0.6**

Birey1:	2	7	55	34	42	→	Çocuk1:	2	74	55	34	4
Birey2:	85	74	11	32	4		Çocuk2:	85	7	11	32	42

Şekil 3. Tekdüze çaprazlama ile elde edilen bireyler

Çalışmamızda α, β, ω kurtlarının pozisyonları birbiriyle 2 kez tekdüze çaprazlamaya tabi tutulmuştur. Elde edilen pozisyon mevcut gri kurt pozisyonuyla tekrar tekdüze çaprazlanmıştır. Bulunan yeni pozisyon mevcut pozisyondan daha iyi uygunluk değerine sahip ise mevcut çözüm yerine alınmıştır. Şekil 4'de yapılan çaprazlamalar şematik olarak gösterilmiştir. Burada $rand()$, $[0,1]$ aralığında oluşturulan rassal sayılardır.



Şekil 4. Tekdüze çaprazlama ile yeni bireyin elde edilmesi

Tekdüze çaprazlama ile GKO algoritmasının başarısını test etmek için OR-Kütüphanesinden 40 adet P-Medyan test verisi alınmıştır. Tablo 1'de verilen test problemlerinin her biri 30 tekrarlı 1000 iterasyon sayısına göre MATLAB programlama dilinde çalıştırılmıştır.

40 P-Medyan problemi için elde edilen sonuçların ortalaması, GAP değerleri (13)-(14) denklemleri ile hesaplanmıştır.

$$ort = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (13)$$

n : ortalaması alınacak sayı adeti, x : ortalaması alınacak sayılar

$$GAP = \frac{ort - optimal}{optimal} \times 100 \quad (14)$$

$optimal$: problemin optimal değeri

Tekdüze çaprazlama ile GKO algoritması sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Tekdüze çaprazlama tekniğinde çaprazlama oranı sabit (0.5) olarak alınmaktadır. Böylece iki birey çaprazlanırken gen alışveriş ihtimali %50’dir. Çaprazlama oranının yüksek olması 2. bireyden daha az gen almayı, düşük olması ise 2. bireyden daha fazla gen almaya sebep olur. Gri kurt algoritmasının (8) eşitliğinde $\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}$ ifadesindeki \vec{a} ava yaklaştıkça iterasyona bağlı olarak değişmektedir. \vec{a} iterasyon boyunca lineer olarak 2’den 0’a kadar azalmaktadır. Bu değişimi çaprazlama tekniğine yansıtmak için tekdüze çaprazlamada çaprazlama oranı 0.5 yerine \vec{a} değerine bağlı olarak $0.25\vec{a}$ olarak yazılmıştır. Elde edilen parametreye bağlı çaprazlama tekniği adaptif tekdüze çaprazlama olarak adlandırılmıştır. Adaptif tekdüze çaprazlama tekniği ile GKO algoritması yardımıyla 40 P-Medyan problemi için elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Tekdüze çaprazlama tekniği kullanılarak elde edilen GAP değerleri ile adaptif tekdüze çaprazlama tekniği ile bulunan GAP değerlerinin ilişkisini karşılaştırmak için Tablo 2’nin son sütununa iyileştirme oranları eklenmiştir. Bu değerler

$$\text{iyileştirme oranı} = \frac{GAP_{\text{tekdüze}} - GAP_{\text{adaptif tekdüze}}}{GAP_{\text{tekdüze}}} \quad (15)$$

oranı ile hesaplanmıştır.

Tablo 2. Tekdüze çaprazlama ve adaptif tekdüze çaprazlama tekniği ile GKO algoritması sonuçları

PROBLEM	OPTİMAL	TEKDÜZE ÇAPRAZLAMA İLE GKO		ADAPTİF TEKDÜZE ÇAPRAZLAMA İLE GKO		İYİLEŞME ORANI
		ORTALAMA	GAP	ORTALAMA	GAP	
pmed1	5819	5833.7	0.2520	5822.5	0.0601	0.76
pmed2	4093	4124.6	0.7729	4111	0.4320	0.44
pmed3	4250	4294.9	1.0573	4259	0.2160	0.80
pmed4	3034	3119.7	2.8269	3075	1.3600	0.52
pmed5	1355	1404	3.6359	1383.7	2.1200	0.42
pmed6	7824	7861	0.4776	7842.5	0.2360	0.51
pmed7	5631	5752.9	2.1654	5677.7	0.8310	0.62
pmed8	4445	4634	4.2557	4544	2.2400	0.47
pmed9	2734	2884	5.5023	2832.7	3.6100	0.34
pmed10	1255	1364.87	8.7543	1327	5.7600	0.34
pmed11	7696	7774.6	1.0209	7718.8	0.2960	0.71
pmed12	6634	6762.7	1.9410	6701.6	1.0200	0.47
pmed13	4374	4601.7	5.2065	4537.8	3.7400	0.28
pmed14	2968	3179.2	7.1170	3125.9	5.3200	0.25
pmed15	1729	1903	10.0906	1855.2	7.3000	0.28
pmed16	8162	8226.3	0.7878	8210.8	0.5980	0.24
pmed17	6999	7186	2.6737	7103	1.4900	0.44
pmed18	4809	5052	5.0523	4987.7	3.7200	0.26
pmed19	2845	3097	8.8530	3028.7	6.4600	0.27
pmed20	1789	2041	14.0898	1963	9.7200	0.31
pmed21	9138	9341.4	2.2262	9261	1.3500	0.39
pmed22	8579	8797	2.5450	8731	1.7700	0.30
pmed23	4619	4921	6.5303	4854	5.0800	0.22
pmed24	2961	3257.9	10.0270	3175.4	7.2400	0.28
pmed25	1828	2155.3	17.9048	2039.8	11.6000	0.35
pmed26	9917	10079	1.6352	10014	0.9800	0.40
pmed27	8307	8502	2.3562	8454	1.7700	0.25
pmed28	4498	4827.1	7.3166	4736	5.3000	0.28
pmed29	3033	3374	11.2419	3281	8.1900	0.27
pmed30	1989	2604	30.9469	2250.2	13.1000	0.58
pmed31	10086	10264.9	1.7737	10160	0.7360	0.59
pmed32	9297	9597	3.2254	9480	1.9700	0.39
pmed33	4700	5066.5	7.7979	4981.5	5.9900	0.23
pmed34	3013	3382.9	12.2768	3291	9.2400	0.25
pmed35	10400	10609	2.0096	10557	1.5100	0.25
pmed36	9934	10221	2.8918	10108	1.7500	0.39
pmed37	5057	5489	8.5373	5371	6.2200	0.27
pmed38	11060	11236.2	1.5931	11178.8	1.0700	0.33
pmed39	9423	9735	3.3139	9598.3	1.8600	0.44
pmed40	5128	5578	8.7858	5472	6.7100	0.24

BULGULAR (RESULTS)

40 P-Medyan problemi tekdüze çaprazlama tekniği ve parametreye bağlı adaptif tekdüze çaprazlama tekniğinin GKO algoritması ile birlikte kullanılmasıyla 30 tekrarlı 1000 iterasyon için çözülmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların ortalama değeri ve optimal çözümle arasındaki yakınlığı gösteren GAP değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 40 test probleminin 40’ında da parametreye bağlı adaptif tekdüze çaprazlama tekniğinin tekdüze çaprazlama tekniğinden daha iyi sonuçlar verdiği, optimal değere daha yakın değerler bulduğu görülmüştür.

40 problemin tümünde adaptif tekdüze çaprazlama tekniğinin etkili olmasından dolayı Friedman sıralama testinde adaptif tekdüze çaprazlama tekniği ile GKO algoritması başarı sıralamasında birinci sırada yer alırken tekdüze çaprazlama tekniği ile GKO algoritması ikinci sırada yer almaktadır. İki tekniği farklı açıdan karşılaştırmak için (15) denklemi kullanılarak iyileştirme oranlarına bakılmıştır. Böylece tekdüze çaprazlama tekniği yardımıyla elde edilen GAP değerlerinin adaptif tekdüze çaprazlama tekniği kullanıldığında hangi oranda iyileştiği gözlemlenmiştir. Genel olarak düşük düğüm sayısına sahip problemlerde daha yüksek iyileştirme oranı olduğu, düğüm sayısı yüksek olduğunda daha düşük iyileştirme olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre en düşük iyileştirme oranı pmed23 probleminde %22, en yüksek iyileştirme oranı pmed3 probleminde %80, ortalama iyileştirme oranı ise %39 olarak hesaplanmıştır. Böylece iterasyon boyunca dinamik olarak değişen çaprazlama oranının daha etkili çözümler ürettiği söylenebilir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada GKO algoritmasına çaprazlama teknikleri uygulanarak P-Medyan problemleri çözülmeye çalışıldı. İlk olarak çaprazlama tekniği olarak tekdüze çaprazlama tekniği kullanıldı. Bu teknikte 0.5 çaprazlama oranına göre iki birey arasında gen alışverişi yapılmaktadır. Çaprazlama oranının 0.5’den yüksek olması ilk bireyden daha fazla genin yeni bireye aktarılması anlamına gelmektedir. Tekdüze çaprazlama tekniği yardımıyla GKO algoritması 40 adet P-Medyan test problemlerine uygulandı, 30 tekrarlı olarak elde edilen çözümlerin ortalaması, optimum çözümle arasındaki GAP değerleri tablo haline getirildi. Daha sonra GKO algoritmasındaki (8) denklemden esinlenilerek yeni bir çaprazlama tekniği oluşturuldu. Bu denklem sayesinde iterasyon ilerledikçe ajan kurtlar ava yaklaşmaktadır. Bu dinamik yapıyı çaprazlama tekniğine taşımak için çaprazlama oranı 0.5 yerine \vec{a} parametresine bağlı olarak yazıldı. Elde edilen yeni adaptif tekdüze çaprazlama tekniği 40 P-Medyan test probleminde uygulandı. İki çaprazlama tekniği karşılaştırıldığında parametreye bağlı adaptif tekdüze çaprazlama tekniğinin 40 P-Medyan problemin tümünde daha başarılı sonuçlar verdiği görüldü.

Karşılaştırmanın istatistiksel olarak ölçülmesi için iki tekniğin kullanılması ile bulunan GAP değerleri arasındaki iyileştirme oranlarına bakıldı. Bu oranlar adaptif tekdüze çaprazlama tekniğinin 40 problemin tamamında iyileştirme sağladığını gösterdi.

Bu çalışma sonucunda sürekli problemler için önerilen GKO algoritması ayrık arama uzayına sahip P-Medyan problemlerine uygulandı. GKO algoritmasını ikili arama uzayına adapte etmek için tekdüze çaprazlama tekniği kullanıldı ve bu teknikte sabit bir değere göre çaprazlama yapmak yerine iterasyon sayısına göre dinamik olarak güncellenen çaprazlama oranının kullanılmasının daha etkili sonuçlar verdiği görüldü.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

G.O.B.: Literatür Taraması (Investigation), Yazı Yazan (Writing - Original Draft), Yazılım (Software),



Malzemeler (Resources), Veri Toplama Ve/Veya İşleme (Data Curation), Analiz Ve/Veya Yorum (Formal Analysis), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing), **H.H.:** Fikir/Kavram (Conceptualization), Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Yazılım (Software), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Malzemeler (Resources), Veri Toplama Ve/Veya İşleme (Data Curation), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] F. A. Hashim, E. H. Houssein, K. Hussain, M. S. Mabrouk, and W. Al-Atabany, Honey badger algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems, *Mathematics and Computers in Simulation*. 192 (2021), 84–110.
- [2] M. Hacibeyoğlu, M. Çelik and Ö. Erdaş Çiçek, Energy efficiency estimation in buildings with k nearest neighbor algorithm, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 5 (2) (2023), 65-74.
- [3] Ö. İnik, E. Ülker, Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD)*. 6 (3) (2017), 85-104.
- [4] D. S. Hochbaum, Approximation Algorithms for NP-Hard Problems. PWS Publishing Company, 1997.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, Particle Swarm Optimization, Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, 1942-1948.
- [6] Karaboğa Derviş, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical Report-tr06*. 200 (2005), 1-10.
- [7] A. Pektaş, O. İnan, Application of tree seed algorithm on clustering problems, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 4 (1) (2022), 1-10.
- [8] S. Mirjalili and A. Lewis, The whale optimization algorithm, *Advances in Engineering Software*. 95 (2016), 51–67. doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [9] M. Bastı, P-Medyan tesis yeri seçim problemi ve çözüm yaklaşımları, *AJIT-e: Online Academic Journal of Information Technology*. 3 (7) (2012), 47-75. doi: 10.5824/1309-1581.2012.2.004.x.
- [10] M. Bastı, Kuruluş Yeri Seçimi Probleminin Çözümünde Meta Sezgisel Algoritmalar (Doktora), İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2012.
- [11] M. You, Y. Xiao, S. Zhang, P. Yang, and S. Zhou, Optimal mathematical programming for the warehouse location problem with euclidean distance linearization, *Computers & Industrial Engineering*. 136, (2019). doi: 10.1016/j.cie.2019.07.020.
- [12] F. B. Özsoydan, T. Saraç, A discrete particle swarm optimization algorithm for bi-criteria warehouse location problem, *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*. 13 (2011), 114-124.
- [13] A. R. Guner, M. Sevкли, A discrete particle swarm optimization algorithm for uncapacitated facility location problem, *Journal of Artificial Evolution and Applications*. (2008) doi: 10.1155/2008/861512.
- [14] N. Özçakar, M. Bastı, P-Medyan kuruluş yeri seçim probleminin çözümünde parçacık sürü optimizasyonu algoritması yaklaşımı, *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*. 41 (2) (2012), 241–257.
- [15] A. Kole, P. Chakrabarti, and S. Bhattacharyya, An ant colony optimization algorithm for uncapacitated facility location problem, *Artificial Intelligence and Applications*. 1 (1) (2014), 55-61.
- [16] E. Baş, E. Ülker, A binary social spider algorithm for uncapacitated facility location problem, *Expert Systems with Applications*. 161 (2020), 1-27.
- [17] M. Karakoyun, A. Özkiş, Development of binary moth-flame optimization algorithms using

- transfer functions and their performance comparison, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 3 (2) (2021), 1-10.
- [18] S. L. Hakimi, Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems, *Operations Research*. 13 (3) (1965), 462-474.
- [19] O. Kariv and S. L. Hakimi, An Algorithmic approach to network location problems, I: the p-centers, *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 37 (3) (1979), 513-538.
- [20] A. H. B. Anuar, M.F.M. Said, Floyd's shortest-path algorithm theory, *Journal of Advanced Computing Research*. 1(1) (2016), 20-21.
- [21] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, Grey wolf optimizer, *Advances in Engineering Software*. 69 (2014), 46–61. doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

Yüksek ve Düşük Plastisiteli Killerde Polipropilen Elyafın Etkisi

Ali Sinan SOĞANCI¹  Ali ORMAN¹ 

¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering,
Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 13.11.2023

Kabul Tarihi: 10.03.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Kil zemin,
Kür,
Polipropilen elyaf,
Tek eksenli basınç
mukavemeti,
Zemin iyileştirilmesi.

ÖZET

Farklı katkılarla zemin stabilizasyonu uzun yıllardan beri geoteknik mühendislerinin ilgisini çekmektedir. Zemin stabilizasyonu ile zayıf zeminin taşıma kapasitesi artırılmakta, toplam oturmalar azaltılmakta, dolgu ve şevlerin stabilitesi sağlanmakta, istinat duvarları desteklenmekte ve potansiyel sıvılaşma riskleri azaltılmaktadır. Bu metotlardan biri de zeminlerin katkı maddesi ile iyileştirilmesidir. Deney programında atık malzemenin değerlendirilmesi kapsamında stabilizasyon amacı ile polipropilen elyaf kullanılmıştır. Düşük ve yüksek plastisiteli killi zemine %0, %0.1, %0.5, %1.0, %1.5 polipropilen elyaf eklenmiştir. Çalışmada, hidrometre deneyi, özgül ağırlık deneyi, Atterberg limitleri, Standart proktor deneyi ve tek eksenli basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre CL ve CH olarak belirlenen kil zemine elyaf ilave edilmesi, farklı kür süreleri sonunda mukavemet değerlerinde artışa neden olmuştur.

The Influence of Polypropylene Fiber on High and Low Plasticity Clay

Article Info

Article History

Received: 13.11.2023

Accepted: 10.03.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Clay soil,
Curing,
Polypropylene fiber,
Soil improvement,
Unconfined compressive
strength.

ABSTRACT

Soil stabilization with different additives has attracted the attention of geotechnical engineers for many years. With soil stabilization, the bearing capacity of weak soil is increased, total settlements are reduced, the stability of fills and slopes is ensured, retaining walls are supported and potential liquefaction risks are reduced. One of these methods is the improvement of soils with additives. Polypropylene fiber was used for stabilization purposes within the scope of evaluation of waste material in the experimental program. 0%, 0.1%, 0.5%, 1.0%, 1.5% polypropylene fiber was added to low and high plasticity clay soil. In the study, hydrometer test, specific gravity test, Atterberg limits, Standard proctor test and uniaxial compressive strength test were performed. Adding fiber to the clay soil, designated as CL and CH according to the unified soil classification system, caused an increase in the strength values at the end of different curing periods.

To cite this article:

Soğancı, A.S. & Orman, A. (2024). The influence of polypropylene fiber on high and low plasticity clay, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 178-187. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.41>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ali Sinan Soğancı, asoganci@erbakan.edu.tr



INTRODUCTION

Today, due to the rapidly increasing construction and decreasing suitable soils for construction, it becomes necessary to build structures on almost all kinds of soils. Especially in transportation and road structures, many weak and problematic soils are sometimes encountered. Changing the construction site or using resistant soils are not a suitable solution due to the technological and economic reasons. On the other hand, increasing industrial wastes cause environmental pollution and the problem of eliminating these wastes is a common problem for all countries. These materials can be building materials such as lime [1], cement [2] and artificial polymers, or fly ash [3], marble dust [4] metal slag, used car tires, which are formed as industrial waste [5-6]. In recent years, the wastes have been used as an alternative additive material in the improvement of soils and it is a more economical solution to improve the properties of problematic soils. One of these soil improvements is the use of polypropylene [7-15]. Sengul et al., had studied the effect of polypropylene fiber on the properties of high clay soils [16]. They added 0.5% fiber to the soil and fiber additives were determined to increase the shear strength at ratios ranging from 3.0% to 21.0%. Komal et al., had investigated the polypropylene and nylon fiber in the soil mixture having silt [17]. Laboratory results have shown that polypropylene and nylon fiber changed the strength positively. Suriya et al., had conducted a study about the performance of the red soil before and after adding polypropylene [18]. They used different percentages of polypropylene (1%, 2%, 3%). The results showed that reinforcing of polypropylene fiber increased the properties of red soil. Çetin and Çetinkaya had studied about the stabilization of clay soils with fiber. In their studies, they reached the highest strength in clay soil with 1% fiber [19, 20].

In the present study, geotechnical properties of clayey soils amended with polypropylene fiber were determined. The novel approach of study is specifying the stabilization effect of fiber considering the clay consistency.

MATERIALS AND METHODS

Two types of clay soils were used in the studies (Fig. 1 and 2). The green clay soil was taken from the land surface in Sarıhıdır Village of Ürgüp District of Nevşehir Province. Ürgüp clay is classified as high plasticity clay according to USCS (ASTM D2487-17e1, 2020) and clay consistency since liquid limit is 97.60% and plastic limit is 31.20% [21]. The second type of clay soil in red color was taken from Avanos District of Nevşehir Province. Avanos clay is classified as low plasticity clay since liquid limit is 46.80% and plastic limit is 23.80%. The samples were brought to Konya Necmettin Erbakan University Engineering Faculty Civil Engineering Department Soil Mechanics Laboratory. The sieve analysis was performed according to (ASTM D6913/D6913M-17 2021), and hydrometer analysis was performed according to (ASTM D7928-21e1, 2021) [22, 23]. The results are shown in Figure 3. Atterberg limits of soils were determined according to ASTM D4318 (2018) [24]. The specific gravity of clays was determined following the ASTM D854-14 (2016) standard [25]. The soil specific gravity of CL soil was determined as 2.61, However the specific gravity of CH soil was determined as 2.65.

The polypropylene fiber used in the experimental studies was obtained from a company in Turkey (Figure 4). The polypropylene fiber is a waste material of factories. The technical properties of the polypropylene fiber used in the experiments are given in Table 1. In order to prepare the mixtures with optimum water content, polypropylene amounts were mixed on the clay soil and compressed in a standard proctor mold. Cylindrical samples were taken from the compressed soil for the unconfined pressure test. For sampling, cylindrical metal tubes with a diameter of 38 mm and a height of 76 mm were driven into the compacted soil (Figure 5). The inside of the cylinder tubes is lubricated with grease. The soil samples taken into the tubes were carefully removed with the help of a hydraulic jack. The extracted samples were bagged without waiting and placed in plastic containers with 1 - 2 cm high water at the bottom, and the plastic containers were covered. The compaction tests were performed according

to (ASTM D698-12, 2021) [26]. In this test, the soil is compressed in a standard mold in 3 layers with 25 hits with a 2.5 kg hammer falling from 30.5 mm. In the unconfined pressure test, the cylindrical soil sample was subjected to only vertical pressure stress without being subjected to any lateral pressure. Loading was done by placing the soil sample between the plates. The samples were cured for 7 and 28 days. The unconfined compression tests were carried out on the samples removed from the cure according to ASTM D2166 [27] (Figure 6).



Figure 1. CL soil



Figure 2. CH soil

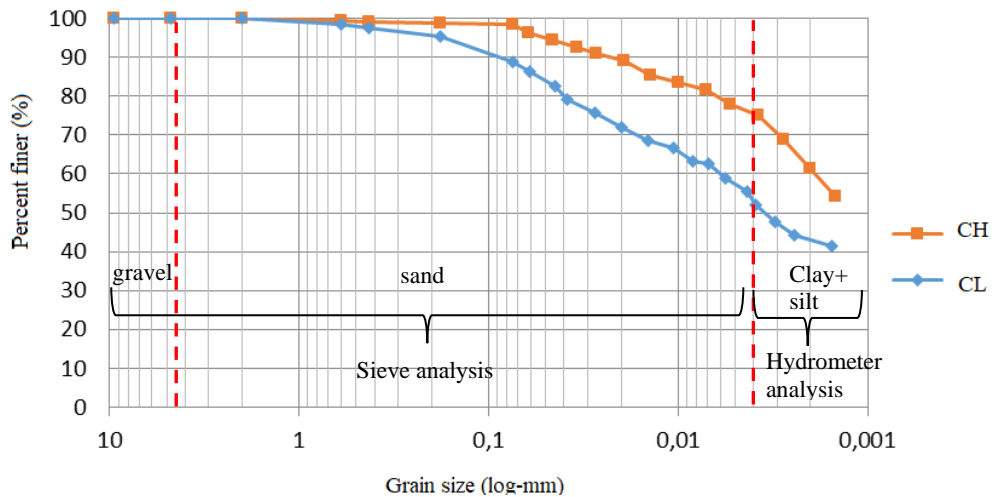


Figure 3. The grain size distribution of the soils



Figure 4. The polypropylene fiber

Table 1. *Technical characteristics of polypropylene fiber*

Chemical structure	100% polypropylene
Packaging	In 0.6 kg paper bags
Appearance-Color	White and embossed plain fiber
Shelf life	24 months from date of manufacture (Unopened package)
Storage conditions	It should be stored at a temperature range of 5 to 30 °C.
Intensity	0.91 g/cm ³
Length	12 mm
Diameter	32 μm
Melting point	170 °C
Tensile strength	430 MPa
Modulus of Elasticity in Tension	6 GPa
Thermal Conductivity	Low
Electrical Conductivity	Low
Acid Resistance	High



Figure 5. *Preparation and curing of samples*



Figure 6. *UCS machine and failed samples*

RESULTS AND DISCUSSION

Compaction Test Results

A series of compaction tests were performed to investigate the max dry density and optimum water content of soil samples with different percentage of polypropylene fiber for two types of clay. The polypropylene fiber addition caused some increases in dry unit volume weights for both soils. The dry unit volume weight reached the highest value by taking the value of 1.675 g/cm³ in the mixture of CL soil and 1.5% polypropylene fiber (Figure 7). In the mixture of CH soil and polypropylene fiber, the highest dry unit volume weight value was 1.380 g/cm³ with 1.0% contribution (Figure 8).

Increment of fiber amount in the stabilized soil leads to an increment in maximum dry density. The fiber material between the soil grains acts as reinforcement, causing the soil structure to be compressed more tightly. The best compaction was obtained when 1.5% fiber was added to the CL soil, while it was obtained when 1% fiber was added to the CH soil. The greatest compression is achieved in CH soil with a lower fiber ratio than in CL soil is due to the fact that the increased fiber ratio reduces the cohesion forces between high plasticity clay minerals.

As the fiber ratio in CL soil increases, the optimum water content increases. The capillary irregularity of the fiber material within the CL soil structure creates an environment suitable for water drainage and requires more water for maximum compaction. However, there is no significant correlation between fiber ratio and variation in optimum water content in CH soil. Due to clay mineralogy and cohesion forces between CH minerals, the fiber material may not be distributed homogeneously within the ground structure.

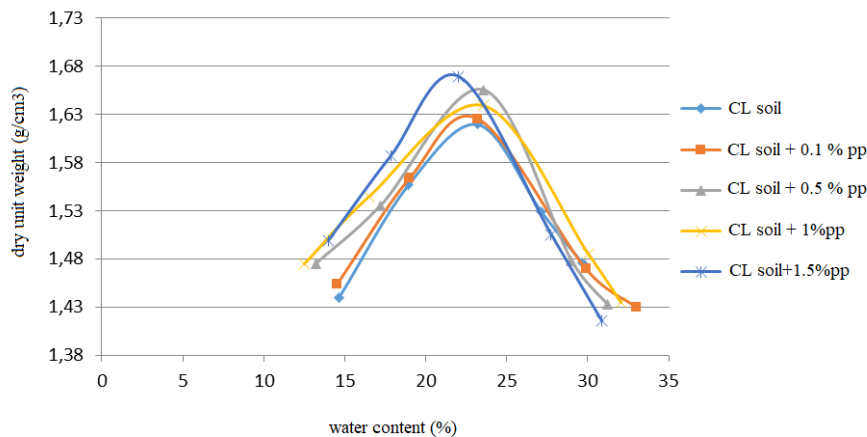


Figure 7. Compaction curves of CL soil and polypropylene fiber mixtures

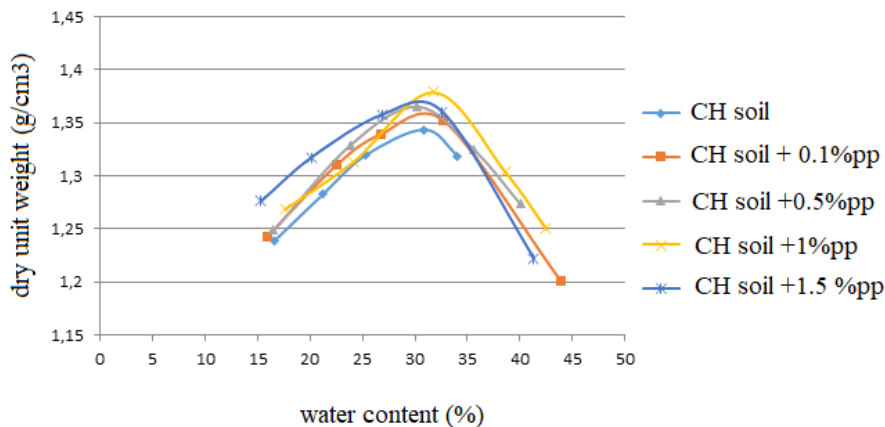


Figure 8. Compaction curves of CH soil and polypropylene fiber mixtures

Unconfined Compressive Strength Test Results

In this study, it was observed that the polypropylene fiber caused an increase in the strength of both CL soil and CH soil. According to the results of the unconfined pressure test performed on polypropylene fiber-added samples, the highest strength values were obtained with 1.0% polypropylene fiber additive by weight of the clay for both soil types (CL and CH soil). For CL soil, it was observed that 1.0% fiber additive increased the strength by 67% compared to natural clay at the end of 7 days of curing (Figure 9) and this value reached 81% at the end of 28 days of curing (Figure 10). Again, for CH soil, it was determined that with the addition of 1.0% polypropylene fiber, there was a 53% increase compared to natural clay at the end of 7 days of curing (Figure 11), and this rate reached 78% at the end of 28 days of curing (Figure 12).

The addition of polypropylene fiber increased the uniaxial strength in low plasticity clay more than high plasticity clay. According to the results of the unconfined compressive test, it was observed that the most effective ratio in soil - fiber mixed samples was 1.0%. If we compare the strength of polypropylene fibers on CL and CH soil, at the end of the 28-day curing period, the CL soil reached a strength of 463 kPa, while this value remained at 399 kPa on the CH soil. In their studies, Çetinkaya and Çetin added 1% fiber to the clay soil and achieved the highest strength. The polypropylene fiber could be used as a soil improvement material in future studies [19, 20].

As the amount of fiber increases, the ductility of the stabilized CL soil increases to 17% compared to natural clay (15%), while the ductility of the stabilized CH soil decreases from 8% to 3-4%.

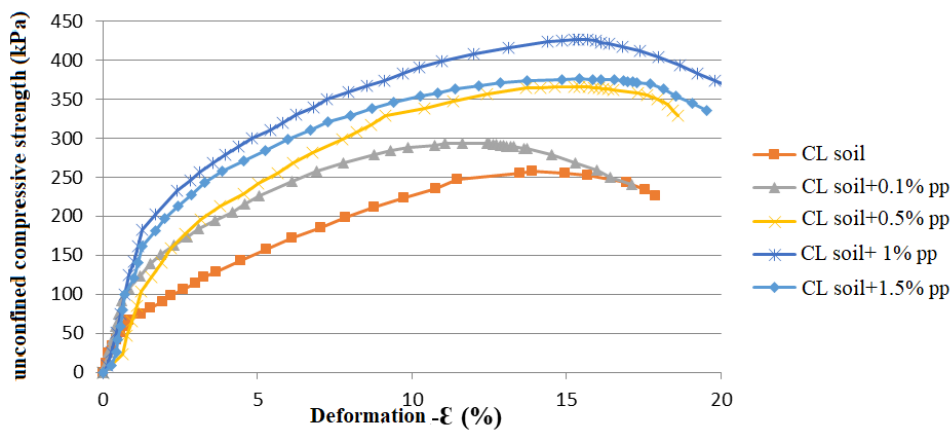


Figure 9. Unconfined compressive test results of 7 days cured CL soil samples

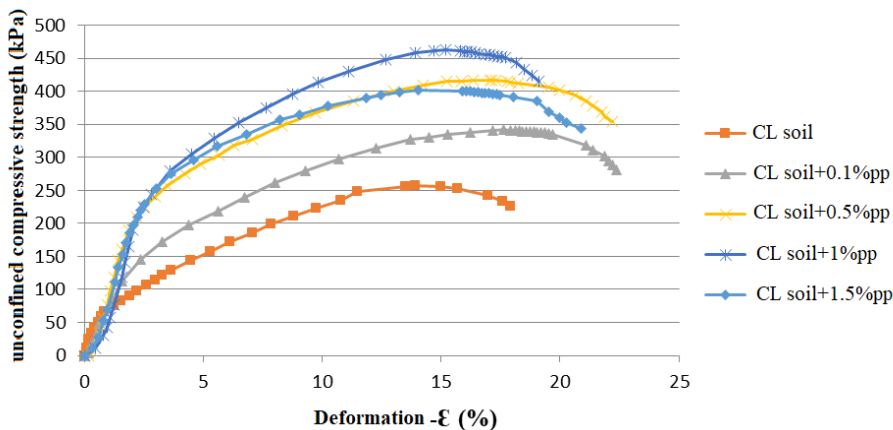


Figure 10. Unconfined compressive test results of 28 days cured CL soil samples

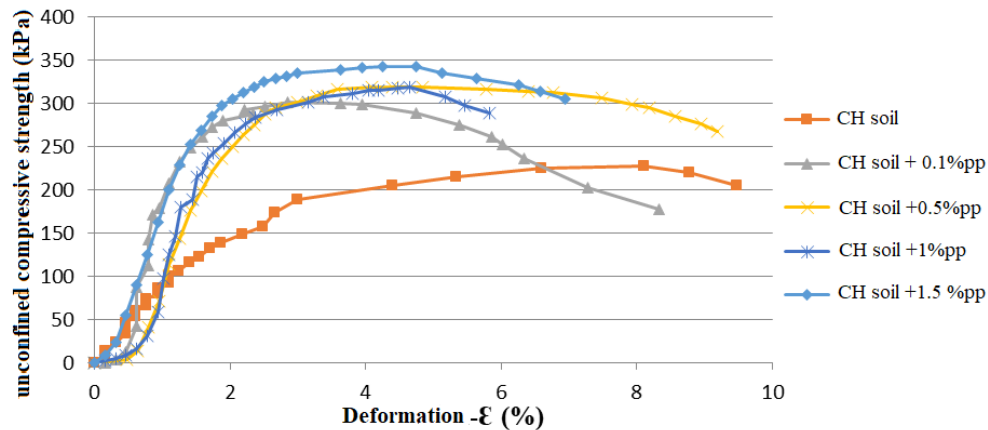


Figure 11. Unconfined compressive test results of 7 days cured CH soil samples

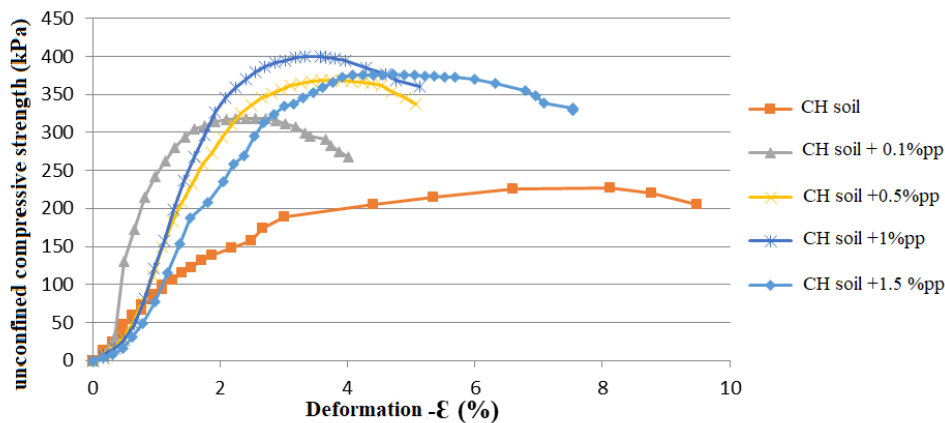


Figure 12. Unconfined compressive test results of 28 days cured CH soil samples

CONCLUSION

In the present study, compaction and strength characteristics of polypropylene fiber stabilized low and high plasticity clays were determined. The results are summarized below:

- The optimum fiber ratio to obtain maximum dry density is 1.5% for CL soil and 1.0% for CH soil. Increment of fiber amount in the stabilized soil leads to an increment in maximum dry density. The fiber material between the soil grains acts as reinforcement, causing the soil structure to be compressed more tightly.
- Increment of the fiber ratio in CL soil, the optimum water content increases since capillary irregularity of the fiber material in the soil structure creates an environment suitable for water drainage. However, there is no significant correlation between fiber ratio and variation in optimum water content in CH soil due to complex clay mineralogy.
- The optimum fiber ratio to obtain maximum strength is 1.0% for CL and CH soil types.
- As the amount of fiber increases, the ductility of the stabilized CL soil increases to 17% compared to natural clay (15%), while the ductility of the stabilized CH soil decreases from 8% to 3-4%.

Test results show that polypropylene fiber can be used in clay stabilization. The optimum fiber ratio can be determined by deciding whether compaction or strength results are prioritized in

soil improvement works.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship contribution statement

A.S.S.: Data Curation, Investigation, Writing-Original Draft, Writing - Review & Editing, **A.O.:** Data Curation, Investigation.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Yıldız, A. S. Soğancı, Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime stabilized clays, *Scientia Iranica*. 19 (2012), 1013–1017.
- [2] Y. Yenginar, M. Olgun, Optimizing installation parameters of DM columns in clay using Taguchi method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 82(4) (2023), 145.
- [3] Y. Yenginar, A.A.M.M. Mobark, M. Olgun, Investigating the construction parameters of deep mixing columns in silty soils, *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 5 (2021), 464-474.
- [4] A. S. Soğancı, Y. Yenginar, A. Orman, Geotechnical properties of clayey soils stabilized with marble dust and granulated blast furnace slag, *KSCE Journal of Civil Engineering*. 27(11) (2023), 4622–4634.
- [5] M. Jafari, M. Esna-ashari, Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze–thaw condition, *Cold Regions Science and Technology*. 82 (2012), 21–29.
- [6] Y. Li, X. Ling, L. Su, L. An, P. Li, Y. Zhao, Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition, *Cold Regions Science and Technology*. 146 (2018), 53-59.
- [7] M.H. Maher, Y.C. Ho, Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite, *Journal of Geotechnical Engineering*. 120 (1994), 1381-1393.
- [8] M.S. Nataraj, K.L. McManis, Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers, *Geosynthetics International*. 4 (1997), 65-79.
- [9] I. Iasbik, D.C. De Lima, C.A.B. Carvalho, C.H.C. Silva, E. Minette, P.S.A. Barbosa, Geotechnical characterization of a clayey soil stabilized with polypropylene fiber using unconfined compression and resilient modulus testing data, *ASTM Special Technical Publication*. 1437 (2002),114-125.
- [10] E.C. Ang, L.J. Erik, Specimen size effects for fiber-reinforced silty clay in unconfined compression, *Geotechnical Testing Journal*. 26 (2003), 191-200.
- [11] Y. Cai, B. Shi, C.W.W. Ng, C.S. Tang, Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil, *Engineering Geology*. 87 (2006), 230-240.
- [12] A. Kumar, B.S. Walia, J. Mohan, Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay, *Construction and Building Materials*. 20 (2006), 1063-1068.
- [13] Z.H. Ozkul, G. Baykal, Shear strength of clay with rubber fiber inclusions, *Geosynthetics International*. 13 (2006),173-180.
- [14] S. D. Rafalko, T.L. Brandon, G.M. Filz, J. K. Mitchell, fiber reinforcement for rapid stabilization of soft clay soils, *Transportation Research Record*. 2026 (2007), 21-29.
- [15] Y. Yilmaz, Experimental investigation of the strength properties of sand-clay mixtures reinforced with randomly distributed discrete polypropylene fibers, *Geosynthetics International*. 16 (2009), 354-363.
- [16] T. Sengul, N. Akray, Y. Vitosoglu, Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils, *Construction and Building Materials*. 400 (2023).
- [17] K. Komal, S. Bawa, S. KantSharma, Laboratory investigation on the effect of polypropylene and nylon fiber on silt stabilized clay, *Materials Today*. 52 (2022), 1368-1376.
- [18] P.A. Suriya, S.P. Sangeetha, R. Abirami, P. Subathra, Stabilization of red soil using polypropylene, *Materials Today*. (2021), 5881-5884.
- [19] A.Y. Çetin, Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*,

İstanbul, 2011.

- [20] M. Çetinkaya, Polipropilen Liflerin Uçucu Kül Zemin Karışımlarında Geoteknik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2012.
- [21] ASTM D2487-17e1, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). In: Book of Standards Volume: 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020: ss. 1-10.
- [22] ASTM D6913/D6913M-17, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. In: Book of Standards Volume: 04.09. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA., ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021: ss. 1-34.
- [23] ASTM D7928-21e1, Standard test method for particle-size distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation(Hydrometer) Analysis. In: Book of Standards Volume: 04.09. ASTMInternational, West Conshohocken, PA, USA, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021: ss. 1-27.
- [24] ASTM D4318-17e1, Standard test methods for liquid limit, plasticlimit, and plasticity index of soils. In: Book of Standards Volume: 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA., ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018: ss. 1-20.
- [25] ASTM D854-14, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. In: Book of Standards Volume: 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016: ss. 1-8.
- [26] ASTM D698-12, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. In: Book of Standards Volume: 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.,ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021: ss. 1-13. 1-13
- [27] ASTM D2166, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. In: Book of Standards Volume: 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA., West Conshohocken, PA, USA, 2016: ss. 1-7.

NLS Yüzeyinin Spacelike Eğrisinin Pseudo Null Darboux Çatısı ile Geometrik Analizi

Melek ERDOĞDU¹  Ayşe YAVUZ² 

¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Science, Department of Mathematics and Computational Science, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan University, Ahmet Keleşoğlu Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Teaching, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 16.01.2024

Kabul Tarihi: 17.03.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

Anahtar kelimeler:

Darboux çatısı,
Doğrusal olmayan Schrödinger
denklemleri,
Hasimoto yüzeyi.

Bu çalışmada, Minkowski uzayında birim hızlı spacelike eğri ile ilişkilendirilmiş dinamik bir sistem olarak ele alarak duman halkası denklemi olarak bilinen girdap filaman denkleminin araştırılması verilmiştir. Darboux çatısı kullanılarak, doğrusal olmayan Schrödinger (NLS) denkleminin karşılık gelen soliton yüzeyinin diferensiyel geometrik özellikleri incelenmiştir. Bu yüzey genellikle NLS yüzeyi veya Hasimoto yüzeyi olarak adlandırılır. Ayrıca, NLS yüzeyinin Gauss ve ortalama eğrilikleri, Darboux eğrilikleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu analiz, NLS yüzeyinin geometrik özelliklerine derinlemesine bir bakış sunarak, bu alandaki bilgiyi artırmaya ve potansiyel uygulamalara ışık tutmaya yönelik önemli bir katkı sağlayacaktır.

Geometric Analysis of the NLS Surface with the Pseudo Null Darboux Frame of Spacelike Curve

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 16.01.2024

Accepted: 17.03.2024

Published: 30.04.2024

Keywords:

Darboux frame,
Hasimoto surface,
Nonlinear Schrödinger
equation,

In this study, examination of the vortex filament equation, known as the smoke ring equation, is given by considering it as a dynamic system associated with a unit speed spacelike curve in Minkowski space. Using the Darboux framework, the differential geometric features of the soliton surface that relate to the nonlinear Schrödinger (NLS) equation were investigated. This surface is often called the NLS surface or Hasimoto surface. Additionally, Gaussian and the mean curvatures of the NLS surface were determined using the Darboux curvatures. By providing an in-depth look at the geometric properties of the NLS surface, this analysis will make a significant contribution to increasing knowledge in this field and shedding light on potential applications.

To cite this article:

Erdoğan, M. & Yavuz, A. (2024). Geometric analysis of the NLS surface with the Pseudo null Darboux frame of spacelike curve, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 188-198. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.42>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Melek Erdoğan, melekrkd@erbakan.edu.tr



INTRODUCTION

The exploration of curves on surfaces within the realm of differential geometry unveils intricate mathematical relationships and geometric phenomena. Using the Darboux frame to better understand a curve located on the Hasimoto surface is an interesting point of exploration in the field of geometry. The intertwining of differential geometry and the study of Hasimoto surfaces, which emerge from solitonic solutions of certain physical models like the nonlinear Schrödinger equation, offers a rich terrain for exploration.

The Darboux frame, a set of vectors typically encompassing the tangent, normal, and binormal vectors associated with a curve, serves as a fundamental tool in characterizing the geometric properties of curves in three-dimensional space. Examining the Darboux frame within the context of Hasimoto surfaces adds an extra layer of complexity and intrigue, as these surfaces are intimately connected to solitonic behavior a phenomenon known for its localized, stable, and particle-like nature.

The main aim of this work is to uncover insights that not only contribute to the theoretical foundations of differential geometry, but also offer practical applications in understanding the behavior of curves in the unique context of Hasimoto surfaces. Through a comprehensive review and analysis, this study endeavors to broaden our understanding of the interplay between geometric structures, providing valuable contributions to both mathematical theory and potential applications in physical modeling.

Examining the movement of a vortex filament reveals the key differential geometry and mathematical physics difficulties. One of the most significant studies that guides us in resolving those critical problems is Hasimoto's study in 1972. It focused on an approximate representation of the self-induced motion of an isolated filament of a vortex moving in an a fluid that is incompressible without stretching. The equation holds

$$\varphi_t = \varphi_s \times \varphi_{ss}$$

if the vortex filament's position vector is represented by $\varphi = \varphi(s, t)$. These vortex motions can be considered to be travelling wave solutions with respect to the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation, as they involve no change in shape [1].

The NLS surfaces or Hasimoto surfaces have connections with the NLS equation. Hasimoto established the complex function $q = \kappa e^{i \int \tau ds}$ of a curvature functions κ, τ and discovered that if the curve expands according to the vortex filament equation, it yields the focusing on the cubic NLS equation [1].

The curves on the Hasimoto surface have been the subject of several research in the literature, some of which have made use of the Darboux frame, also referred to as the frame of the curve-surface pair. A adaptable frame characterized by three invariant functions, the Darboux frame is defined on a curve which occurs on a surface [2]. The study of the smoke ring equation, which involves investigating the the soliton surface soliton surface connected to the NLS formula, also known as the Hasimoto surface, using the Darboux frame [3]. Additionally, a study has been conducted to examine the Darboux frame of a pseudo null curve situated on a lightlike surface, emphasizing its significance in Minkowski space [4].

Hasimoto surfaces for several types of curve establishment that correspond to a Frenet frame in Minkowski space were investigated, further emphasizing the significance of the Darboux frame in understanding these surfaces [5]. Additionally, it has been investigated what the Darboux frame is defined for lightlike surface, providing insights into its application in physics and linguistics [6]. The study of the Hasimoto surfaces using the Bishop frame also contributes to the understanding of the Darboux frame's role in characterizing surfaces in different spaces [7].

In summary, the literature review reveals that a curve on a Hasimoto surface has been extensively studied in various geometric contexts, including different space geometries, mathematical physics, and surface characterizations. These studies demonstrate the broad applicability and significance of the Darboux frame in understanding the geometric properties of curves on Hasimoto surfaces. Overall, the literature provides a comprehensive understanding of the Darboux frame, offering insights into its geometric properties, invariants, and its connection to various mathematical and physical concepts.

Binormal motion of curves having constant curvature gives rise to integrable expansions of the Dym equations, as the research [8] explains. Moreover, It can also be attributed to integrable variations of the classical sine-Gordon equations and was previously proven that it comes within the binormal motion of curves with constant torsion. Simultaneously, a Backlund transformation is carried out, helping us to create the related soliton surfaces. The research paper demonstrates analogies across Backlund's and Bianchi's standard transformations regarding the extended sine-Gordon system in [9]. Initially, the NLS equation was examined in kinematic examinations that focused on specific hydrodynamic motions, and later, its general intrinsic geometric characteristics were investigated [10], and then utilized in magneto-hydrodynamics [11]. Recent developments indicated a requirement for research into non-Euclidean geometries. A normal congruence in three-dimensional Minkowski space is the main topic of the study [12], and it investigates the NLS equation of repulsive type and nonlinear heat systems. In [13] Hasimoto surfaces are examined in Minkowski 3-space and identified their distinctive geometric characteristics.

The purpose of this research is to contribute to the body of knowledge in both differential geometry and mathematical physics by offering a focused exploration of the Darboux frame in the specific context of curves on the NLS surfaces. Through this investigation, we seek to uncover new insights, establish connections between geometric and physical phenomena, and potentially open avenues for further research and applications. In this study, we explore the differential geometric features of the soliton surface associated with the Nonlinear Schrödinger equation, also known as the NLS surface or Hasimoto surface. A quick overview is presented to provide background details and context beforehand we get started. The geometric characteristics of the NLS surface is then discussed. We determine the Gaussian and mean curvature of the NLS surface. In addition, we obtain new information as well as the essential and sufficient requirements for the NLS surfaces to be flat or minimal.

MATERIALS AND METHODS

In this part, we provide the background information about spacelike curves on lightlike surfaces that is required to grasp the primary subject of the study. Let $\alpha: I \rightarrow E_1^3$ be a regular unit speed spacelike

curve. At any point along the curve α , we may construct a Frenet frame $\{T, N, B\}$ satisfying the followings:

$$\langle T, T \rangle = 1,$$

$$\langle N, N \rangle = -\langle B, B \rangle = \varepsilon_1 = \pm 1,$$

$$\langle T, N \rangle = \langle N, B \rangle = \langle T, B \rangle = 0,$$

$$T \times N = -\varepsilon_1 B,$$

$$N \times B = T,$$

$$B \times T = \varepsilon_1 N.$$

The Serret-Frenet formulas of α are given by

$$T'(s) = \varepsilon_1 \kappa(s) N(s),$$

$$N'(s) = -\kappa(s) T(s) - \varepsilon_1 \tau(s) B(s),$$

$$B'(s) = -\varepsilon_1 \tau(s) N(s).$$

However, since the unit speed spacelike curve α lies on the lightlike surface, we can additionally establish alternative pseudo null frame fields on the curve α , which is referred to as the Darboux frame [4].

The unit tangent vector field T of the unit speed spacelike curve α and the null normal vector field n of the surface on the curve α comprise the Darboux frame. There is only one way to select the last frame field g , which is null vector field in order to characterize a pseudo null frame that includes these vector fields. This suggests that we have the following relationships

$$\langle T, T \rangle = 1,$$

$$\langle n, n \rangle = \langle g, g \rangle = \langle T, g \rangle = \langle T, n \rangle = 0,$$

$$\langle g, n \rangle = \varepsilon_1 = \pm 1$$

$$T \times g = \varepsilon_1 g,$$

$$g \times n = T,$$

$$n \times T = \varepsilon_1 n.$$

The derivative formulas of the Darboux frame fields $\{T, g, n\}$ are given by

$$T'(s) = \varepsilon_1 k_n(s) g(s) + \varepsilon_1 k_g(s) n(s),$$

$$g'(s) = -k_g(s) T(s) + \varepsilon_1 \tau_g(s) g(s),$$

$$n'(s) = -k_n(s) T(s) - \varepsilon_1 \tau_g(s) n(s)$$

where k_n is the normal curvature, k_g is the geodesic curvature, and τ_g is the geodesic torsion of the curve α [4].

The following situations are satisfied for a curve lying on a surface:

- i) $k_g = 0$ if and only if the curve α is a geodesic curve.

ii) $k_n = 0$ if and only if the curve α is an asymptotic curve.

iii) $\tau_g = 0$ if and only if the curve α is a principal line curve.

RESULTS

This section will provide an overview and look at the geometric features of the soliton surface related to the NLS equation. For this investigation, s -parameter curves on the soliton surface $\varphi = \varphi(s, t)$ will be used. Derivative formulas will be obtained depending on the time parameter of the Darboux vector fields T, g, n of the spacelike s parameter curve $\varphi = \varphi(s, t)$ for all t .

The metric coefficient matrix is obtained corresponding to the Darboux frame fields as follows:

$$I^* = \begin{bmatrix} \langle T(s), T(s) \rangle & \langle T(s), g(s) \rangle & \langle T(s), n(s) \rangle \\ \langle g(s), T(s) \rangle & \langle g(s), g(s) \rangle & \langle g(s), n(s) \rangle \\ \langle n(s), T(s) \rangle & \langle n(s), g(s) \rangle & \langle n(s), n(s) \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_1 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

If we denote semi skew symmetric matrix with respect to the above metric coefficient matrix

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}$$

then we get the following matrix equation

$$- \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{32} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \varepsilon_1 a_{13} & \varepsilon_1 a_{12} \\ \varepsilon_1 a_{31} & a_{33} & a_{32} \\ \varepsilon_1 a_{21} & a_{23} & a_{22} \end{bmatrix}$$

by

$$I^* A I^* = -A^T.$$

This means that

$$\begin{aligned} a_{11} &= 0, \\ a_{21} + \varepsilon_1 a_{13} &= 0, \\ a_{31} + \varepsilon_1 a_{12} &= 0, \\ a_{12} + \varepsilon_1 a_{13} &= 0, \\ a_{22} + a_{33} &= 0, \\ a_{13} + \varepsilon_1 a_{12} &= 0, \\ a_{32} &= a_{23} = 0. \end{aligned}$$

Thus, semi skew symmetric matrix A can be written as follows;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \delta & \beta \\ -\varepsilon_1 \beta & \gamma & 0 \\ -\varepsilon_1 \delta & 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$

for some real numbers δ, β and γ .

Theorem. Consider a NLS surface $\varphi = \varphi(s, t)$ such that, for any t , $\varphi = \varphi(s, t)$ is a unit speed spacelike curve. Partial derivative formulas according to the s and t parameters of the Darboux frame defined on the soliton surface are obtained as follows:

$$i) \quad \frac{\partial}{\partial s} \begin{bmatrix} T \\ g \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_1 k_n & \varepsilon_1 k_g \\ -k_g & \varepsilon_1 \tau_g & 0 \\ -k_n & 0 & -\varepsilon_1 \tau_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ g \\ n \end{bmatrix},$$

$$ii) \quad \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} T \\ g \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \delta & \beta \\ -\varepsilon_1 \beta & \gamma & 0 \\ -\varepsilon_1 \delta & 0 & -\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ g \\ n \end{bmatrix},$$

where

$$\delta = \varepsilon_1 k_n \tau_g + \frac{\partial}{\partial s} k_n,$$

$$\beta = \varepsilon_1 k_g \tau_g - \frac{\partial}{\partial s} k_g,$$

$$\gamma = \frac{1}{k_n} \left(\varepsilon_1 \frac{\partial}{\partial s} (\varepsilon_1 k_n \tau_g + \frac{\partial}{\partial s} k_n) + \varepsilon_1 k_n \tau_g^2 + \frac{\partial}{\partial s} k_n \tau_g - \frac{\partial}{\partial t} k_n \right).$$

Here k_n is nonzero normal, k_g is the geodesic curvatures and τ_g is the geodesic torsion of spacelike curve $\varphi = \varphi(s, t)$ for all t .

Proof. i) This is accomplished using derivative formulae of vector fields T, g, n .

ii) It is known that there are smooth functions δ, β, γ such that

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} T \\ g \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \delta & \beta \\ -\varepsilon_1 \beta & \gamma & 0 \\ -\varepsilon_1 \delta & 0 & -\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ g \\ n \end{bmatrix}.$$

We obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s} (T_t) &= \frac{\partial}{\partial s} (\delta g + \beta n) \\ &= (-\delta k_g - \beta k_n) T \\ &\quad + \left(\frac{\partial \delta}{\partial s} + \delta \varepsilon_1 \tau_g \right) g + \left(\frac{\partial \beta}{\partial s} - \beta \varepsilon_1 \tau_g \right) n \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (T_s) &= \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_1 k_n g + \varepsilon_1 k_g n) \\ &= \varepsilon_1 (\varepsilon_1 \beta k_n - \varepsilon_1 \delta k_g) T \\ &\quad + \left(\frac{\partial k_n}{\partial t} + k_n \gamma \right) g + \left(\frac{\partial k_g}{\partial t} - k_g \gamma \right) n. \end{aligned}$$

The following equation is obtained from the equality of the coefficients of the Darboux frame fields in the compatibility $\frac{\partial}{\partial s} (T_t) = \frac{\partial}{\partial t} (T_s)$.

$$\frac{\partial \delta}{\partial s} = \varepsilon_1 \frac{\partial k_n}{\partial t} + \varepsilon_1 k_n \gamma - \delta \varepsilon_1 \tau_g \tag{1}$$

and

$$\frac{\partial \beta}{\partial s} = \beta \varepsilon_1 \tau_g + \frac{\partial k_g}{\partial t} - k_g \gamma$$

By using the compatibility conditions of the vector field g and making the necessary adjustments, the following equations are obtained.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s}(g_t) &= \frac{\partial}{\partial s}(-\varepsilon_1 \beta T + \gamma g) \\ &= \left(\varepsilon_1 \frac{\partial \beta}{\partial s} - k_g \gamma \right) T \\ &\quad + \left(-\beta k_n + \frac{\partial}{\partial s} \gamma + \varepsilon_1 \gamma \tau_g \right) g + (-\beta k_g) n \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(g_s) &= \frac{\partial}{\partial t}(-k_g T + \varepsilon_1 \tau_g g) \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial t} k_g - \beta \tau_g \right) T \\ &\quad + \left(-\delta k_g + \varepsilon_1 \frac{\partial}{\partial t} \tau_g + \varepsilon_1 \gamma \tau_g \right) g + (-\beta k_g) n. \end{aligned}$$

Then the following equation is obtained

$$\frac{\partial}{\partial s} \gamma = \beta k_n - \delta k_g + \varepsilon_1 \frac{\partial}{\partial t} \tau_g.$$

We have

$$\varphi_t = \varphi_s \times \varphi_{ss}$$

because $\varphi = \varphi(s, t)$ is a NLS surface in which $\varphi = \varphi(s, t)$ is a unit spacelike curve for every t .

This implies

$$\begin{aligned} \varphi_t &= T \times (\varepsilon_1 k_n g + \varepsilon_1 k_g n) \\ &= \varepsilon_1 \varepsilon_1 k_n g + (-\varepsilon_1) \varepsilon_1 k_g n \\ &= k_n g - k_g n. \end{aligned}$$

We have found

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s}(\varphi_t) &= \frac{\partial}{\partial s}(k_n g - k_g n) \\ &= \left(\varepsilon_1 k_n \tau_g + \frac{\partial}{\partial s} k_n \right) g + \left(\varepsilon_1 k_g \tau_g - \frac{\partial}{\partial s} k_g \right) n \end{aligned}$$

and

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_s) = \frac{\partial}{\partial s}(T) = \delta g + \beta n.$$

Compatibility condition $\frac{\partial}{\partial s}(\varphi_t) = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_s)$ implies that

$$\delta = \varepsilon_1 k_n \tau_g + \frac{\partial}{\partial s} k_n,$$

$$\beta = \varepsilon_1 k_g \tau_g - \frac{\partial}{\partial s} k_g.$$

Substituting above equations to Equation 1, we find

$$\gamma = \frac{1}{k_n} \left(\varepsilon_1 \frac{\partial}{\partial s} (\varepsilon_1 k_n \tau_g + \frac{\partial}{\partial s} k_n) + \varepsilon_1 k_n \tau_g^2 + \frac{\partial}{\partial s} k_n \tau_g - \frac{\partial}{\partial t} k_n \right).$$

Theorem. Consider a NLS surface $\varphi = \varphi(s, t)$ such that, for any t , $\varphi = \varphi(s, t)$ is a unit speed spacelike curve. The Gaussian and mean curvatures of the NLS surface are

$$K = \varepsilon \left(\left(-2k_n k_g \gamma - \frac{\partial}{\partial t} (k_g - k_n) \right) + \frac{\left(\frac{\partial}{\partial s} (k_n k_g) \right)^2}{2\varepsilon_1 k_n k_g} \right)$$

and

$$H = \varepsilon \frac{-4k_n^2 k_g^2 + 2k_n k_g \gamma + \frac{\partial}{\partial t} (k_g - k_n)}{-4\varepsilon_1 k_n k_g},$$

where $\varepsilon = \langle Z, Z \rangle$, respectively.

Proof. The Lorentzian product of a surface in three-dimensional Minkowski space on its tangent space is the first fundamental form. We need to find the first fundamental form of the NLS surface $\varphi = \varphi(s, t)$. We may write

$$\begin{aligned} I &= \left\langle \frac{\partial \varphi}{\partial s} ds + \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt, \frac{\partial \varphi}{\partial s} ds + \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt \right\rangle \\ &= \langle T ds + (k_n g - k_g n) dt, T ds + (k_n g - k_g n) dt \rangle \\ &= ds^2 - 2\varepsilon_1 k_n k_g dt^2. \end{aligned}$$

Thus, coefficients of first fundamental form are obtained as

$$\mathbf{E} = 1,$$

$$\mathbf{F} = 0,$$

$$\mathbf{G} = -2\varepsilon_1 k_n k_g.$$

So, we have

$$\mathbf{EG} - \mathbf{F}^2 = -2\varepsilon_1 k_n k_g.$$

Suppose that normal vector field of the surface is written as follows

$$Z = \varpi T + \rho g + \zeta n$$

for some differentiable functions ϖ, ρ and ς . We know that

$$\langle Z, \varphi_s \rangle = 0.$$

This implies

$$\varpi = 0.$$

Similarly, we have

$$\langle Z, \varphi_t \rangle = 0,$$

Then we get

$$\langle \rho g + \varsigma n, k_n g - k_g n \rangle = 0.$$

So, we find

$$-k_g \rho + \varsigma k_n = 0.$$

We obtain

$$\rho = k_n, \varsigma = k_g.$$

Thus, the normal vector field of the Hasimoto surface $\varphi = \varphi(s, t)$ is obtained as follows

$$Z = k_n g + k_g n.$$

We also see that

$$\langle Z, Z \rangle = 2\varepsilon_1 k_n k_g$$

The character of the normal vector Z is determined by the signs of ε_1, k_n, k_g variables. We know that

$$\varphi_{ss} = \varepsilon_1 k_n g + \varepsilon_1 k_g n,$$

$$\varphi_{st} = \left(\varepsilon_1 k_n \tau_g + \frac{\partial}{\partial s} k_n \right) g + \left(\varepsilon_1 k_g \tau_g - \frac{\partial}{\partial s} k_g \right) n,$$

$$\varphi_{tt} = (-\varepsilon_1 k_n \beta + \varepsilon_1 k_g \delta) T + \left(k_n \gamma + \frac{\partial}{\partial t} (k_n) \right) g + \left(k_g \gamma - \frac{\partial}{\partial t} (k_g) \right) n.$$

Coefficients of the second fundamental form of the NLS surface $\varphi = \varphi(s, t)$ are determined as

$$\mathbf{e} = \langle Z, \varphi_{ss} \rangle = 2\varepsilon_1 k_n k_g,$$

$$\mathbf{f} = \langle Z, \varphi_{st} \rangle = \frac{\partial}{\partial s} (k_n k_g),$$

$$\mathbf{g} = \langle Z, \varphi_{tt} \rangle = 2k_n k_g \gamma + \frac{\partial}{\partial t} (k_g - k_n).$$

If the necessary operations are carried out, we obtain

$$H = \varepsilon \frac{-4k_n^2 k_g^2 + 2k_n k_g \gamma + \frac{\partial}{\partial t} (k_g - k_n)}{-4\varepsilon_1 k_n k_g},$$

$$K = \varepsilon \frac{2\varepsilon_1 k_n k_g \left(2k_n k_g \gamma + \frac{\partial}{\partial t} (k_g - k_n) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial s} (k_n k_g) \right)^2}{-2\varepsilon_1 k_n k_g},$$

respectively.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

It is known that the relationship between geometric analyzes in Minkowski space and differential equations sheds light on studies in the field of physics. For example, the solution to the optical fiber differential equations involving the position vector field is identified. This normal congruence of surfaces has intrinsic geometrical characteristics that are described in the context of vectors of electromagnetic waves. We examine situations in which particular electric charge and current densities allow electromagnetic and magnetic vectors to meet the requirements of Maxwell's equations [14]. Moreover, sufficient as well as necessary conditions for the geometric phase are provided to allow for EM wave vectors to be executed in parallel with the pseudo null frame[15]. There are also studies on some engineering topics that are known to be related to differential equations and geometric analysis. Engineering studies addressing some of these issues can be found at [16-18].

The study examines the spacelike curve in Minkowski space as a dynamic system and analyzes the smoke ring equation, additionally referred to as the vortex filament equation. Using the Darboux frame, the geometric properties of the soliton surface corresponding to NLS equation have been studied in detail; this surface is often referred to as the NLS surface or Hasimoto surface.

The results obtained provide an in-depth look at the mathematical properties of the NLS surface, increasing knowledge in this field and opening new perspectives on potential applications. In agreement with relevant literature, our analyzes helped us understand the dynamic properties of spacelike curves on the NLS surface.

The results of this study provide several recommendations for future researchers and those working in related fields. Further experimental and theoretical studies on the dynamic behavior of spacelike curves on the NLS surface can deepen the knowledge in this field. Additionally, the results obtained may inspire researchers interested in mathematical physics, differential geometry and nonlinear equations to develop new methods and approaches. In this context, in future studies, further research can be recommended to explore the potential applications of curves on the NLS surface in various physical systems.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.

Authorship contribution statement

M.E.: Conceptualization, Methodology, Writing-Original Draft, Investigation, Writing- Review & Editing **A.Y.:** Conceptualization, Methodology, Writing-Original Draft, Formal Analysis, Writing-Review & Editing.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Hasimoto, A soliton on a vortex filament, *Journal of Fluid Mechanics*. 51(3) (1972), 477-485.
- [2] S. Izumiya, S. Otani, Flat approximations of surfaces along curves, *Demonstratio Mathematica*. 48(2) (2015), 217-241.
- [3] M. Erdoğan, A. Yavuz, Differential geometric aspects of nonlinear Schrödinger equation. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*. 70(1) (2021), 510-521.
- [4] J. Djordjević, E. Nešović, On generalized Darboux frame of a pseudo null curve lying on a lightlike surface in Minkowski 3-Space. *International Electronic Journal of Geometry*. 16(1) (2023), 81-94.
- [5] N. Gürbüz, W. Y. Dae, Hasimoto surfaces for two classes of curve evolution in Minkowski 3-space, *Demonstratio Mathematica*. 53(1) (2020), 277-284.
- [6] E. S. Y. Topbaş, İ. Gök, N. Ekmekçi, Y. Yaylı, Darboux frame of a curve lying on a lightlike surface, *Mathematical Sciences and Applications E-Notes*. 4(2) (2016), 121-130.
- [7] E. Hamouda, O. Moaaz, C. Cesarano, S. Askar, A. Elsharkawy, Geometry of solutions of the quasi vortex filament equation in Euclidean 3-Space E^3 , *Mathematics*. 10(6) (2022), 891.
- [8] W. K. Schief, C. Rogers, Binormal motion of curves of constant curvature and torsion. Generation of soliton surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 455 (1988), 3163-3188.
- [9] C. Rogers, W. K. Schief, Intrinsic geometry of the NLS equation and its auto-Bäcklund transformation. *Studies in Applied Mathematics*. 101(3) (1998), 267-287.
- [10] A. W. Marris, S.L. Passman, Vector fields and flows on developable surfaces, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 32 (1969), 29-86.
- [11] C. Rogers, J. G. Kingston, Nondissipative magneto-hydrodynamic flows with magnetic and velocity field lines orthogonal geodesics, *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 26(1) (1974), 183-195.
- [12] N. Gürbüz, Intrinsic geometry of the NLS equation and heat system in 3-dimensional Minkowski space, *Advanced Studies in Theoretical Physics*. 4 (2010), 557-564.
- [13] M. Erdoğan, M. Özdemir, Geometry of Hasimoto surfaces in Minkowski 3-space. *Mathematical Physics, Analysis and Geometry*. 17 (2014), 169-181.
- [14] A. Yavuz, On normal congruence of surfaces and position vector of optical fiber by electromagnetic wave vectors. *Optik*. 260 (2022), 168994.
- [15] M. Erdoğan, Electromagnetic waves along pseudo null curves in Minkowski space. *Heliyon*. 8(8) (2022).
- [16] M. Uyaner, A. Yar, Nano elyaf takviyeli nanokompozit üretimi ve karakterizasyonu. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1(1) (2019), 10-19.
- [17] S. Ata, M.E. Boyacıoğlu, R. Şahin, A. Kahraman, ORÇ ile düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik üretilmesinde ıslak ve yeni nesil akışkanların çevresel ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 3(1) (2021), 13-23.
- [18] B. Gökçe, O. B. Özden, Kaynaklı bağlantıya sahip karmaşık bir yapıda goldak modeli kullanılarak distorsiyonların ve kalıntı gerilmelerin nümerik analizler ile belirlenmesi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5(2) (2023), 16-27.