



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XXI

SAYI / NUMBER: 3

HAZİRAN / JUNE 2021

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

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

Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and
Engineering



<http://fmbd.aku.edu.tr>

<http://fmbd.aku.edu.tr>

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ
DERGİSİ**

*Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 21
Sayı / Number 3

e – ISSN: 2149-3367

HAZİRAN 2021

JUNE 2021

Derginin Amacı ve İÇeriği

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

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir.

Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi; Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından 1999'dan bu yana yılda 2 sayı (Haziran ve Aralık) Türkçe veya İngilizce olarak hazırlanan çalışmaları yayınlanan, bilimsel ve hakemli bir dergidir.

Dergimizde makale değerlendirme sürecinin daha şeffaflaştırılması ve hızlandırılması için şubat 2013 itibarıyla online makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır.

Ocak 2015 itibaren dergimiz; yayınlanma süreci ile yazarlara ve gerekse yapılan çalışmalara pratik ulaşma imkânları nedeniyle okuyuculara birçok avantajlar sağlayan; elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yılda 3 sayı (Nisan, Ağustos ve Aralık) Türkçe ve İngilizce makaleleri kabul edecek ve çift taraflı kör hakemlik esasına göre en az iki hakemli olarak değerlendirilmektedir. Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi sayfamızdan (<https://fenbildergi.aku.edu.tr/> yada <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid>) kayıt yaptıırarak, özgün bilimsel makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Özellikle lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak yapılan özgün bilimsel çalışmalar teşvik edilmektedir.

Ocak 2020 yılından itibaren dergimiz; yılda 6 sayı (şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olmak üzere özgün araştırma makalelerini kabul etmektedir.

Dergimizde yayımlanan makaleler izin alınmaksızın başka bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Makalelerin bir kısmı veya tamamı dergimiz kaynak gösterilmeden kullanılamaz.

Dergimize hem hakem hem de yazar olarak katkılarınızı beklemekteyiz. Dergimize olan desteğiniz için şimdiden teşekkür eder, çalışmalarınızda başarılar dilerim.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Tamer BAYBURA, Survey Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: tbaybura@aku.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / EDITORIAL BOARD

Afife Binnaz HAZAR, Metallurgy and Materials Engineering, Yıldız Teknik University, (Turkey)
e-mail: afife.hazar@gmail.com

Ahmet YILDIZ, Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ayildiz@aku.edu.tr

Atilla EVCİN, Material Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: evcin@aku.edu.tr

Bojan Zlender, Civil Engineering, University of Maribor, (Slovenia)
e-mail: bojan.zlender@um.si

Cevat İNAL, Survey Engineering, Konya Teknik University, (Turkey)
e-mail: cinal@ktun.edu.tr

Fatih Onur HOCAOĞLU, Electrical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: fohocaoglu@gmail.com

Hüseyin Ali YALIM, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: hayalim@aku.edu.tr

Hüseyin BAYRAKÇEKEN, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: bceken@aku.edu.tr

İbrahim EROL, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ierol@aku.edu.tr

İsmail Sedat BÜYÜKSAGIŞ, Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: sbsagis@aku.edu.tr

İsmail ZORLUER, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: izarluer@aku.edu.tr

Meltem DİLEK, Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: mdilek@aku.edu.tr

Muhittin BAŞER, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: mbaser@aku.edu.tr

Mustafa YILDIZ, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: mustafa_yildizus@yahoo.com

Mustaque Hossain, Civil Engineering, Kansas State University, (USA)
e-mail: mustak@k-state.edu

Ramazan ŞEVİK, Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ramazansevik03@yahoo.com

Regita Bendikiene, Department of Production Technologies, Kaunas University of Technology,
(Lithuania)
e-mail: regita.bendikiene@ktu.lt

Sinan SARAŐLI, Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ssaracli@aku.edu.tr

Őükrü TALAŞ, Metallurgy and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: stalas@aku.edu.tr

Uőman ERŐÜN, Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: uergun@aku.edu.tr

Yüksel OŐUZ, Electrical Electronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: yukseloguz@aku.edu.tr

ADRES/ADDRESS:

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, 03200, AFYONKARAHİSAR
Telefon: 444 03 03 / 1460-14670
Belgegeçer: 0 272 218 14 62
e-posta: fmbd@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article Balıkesir Kıyı Kumullarındaki Bitki Çeşitliliği ve Tehdit Faktörleri Plant Diversity and Threat Factors in the Coastal Dunes of Balıkesir Fatih SATIL, Gülendam TÜMEN, Selami SELVİ	031001 (507-519)
Araştırma Makalesi / Research Article Ballakayati'nin (Erbil - Kuzey Irak) Yabani Gıda Bitkileri Hakkında Geleneksel Bilgiler Traditional Knowledge on Wild Food Plants in Ballakayati (Erbil - North Iraq) Awara Mohammed A.M.A. KAWARTY, Lütfi BEHÇET, Uğur ÇAKILCIOĞLU	031002 (520-531)
Araştırma Makalesi / Research Article Gadobutrol'ün Sitokinezi Bloke Edilmiş Mikronükleus Tekniği ile Genotoksik ve Sitotoksik Potansiyelinin Değerlendirilmesi Assesment of Genotoxic and Cytotoxic Potential of Gadobutrol by Using Cytokinesis-Blocked Micronucleus Assay Hayal ÇOBANOĞLU	031003 (532-537)

KİMYA / CHEMISTRY (12)

Araştırma Makalesi / Research Article Zn ²⁺ İyonları ile Çapraz Bağlı Sodyum Karboksimetil Selüloz Kürelerden Flurbiprofenin Kontrollü Salımı Controlled Release of Flurbiprofen from Sodium Carboxymethyl Cellulose Spheres Crosslinked with Zn ²⁺ Ions Emine BULUT	031201 (538-548)
--	-------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2} (G, w)$ Uzayı Üzerinde Öteleme Operatörünü İçeren Fonksiyonların Sürekliliği Üzerine On Continuity of Functions Involving the Translation Operator on the Space $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2} (G, w)$ Nilay DEĞİRMEN, İbrahim DEĞİRMEN	031301 (549-558)
---	-------------------------

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

Araştırma Makalesi / Research Article Leiden Algoritmasında Kalite Faktörünün Etkisi The Effect of Scoring Factor for Leiden Algorithm Serkan GÜLDAL	035101 (559-564)
Araştırma Makalesi / Research Article Güvenlik Sistemleri için Silah ve Bıçak Tanıma Gun and Knife Detection for Surveillance Systems Şahin IŞIK, Şerif Ercan ÖZKAN, Zühal KURT	035102 (565-569)

Araştırma Makalesi / Research Article FV Panel Temizliği için Doğrusal Motor ve Mekanizma Tasarımı Lineer Motor and Mechanism Design for PV Panel Cleaning Mustafa EKER, Yusuf AVŞAR, Ahmet FENERCİOĞLU	035201 (570-578)
Araştırma Makalesi / Research Article Endüstriyel Amaçlı Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Evirici Yapısı Three Phase Multi Level Inverter Structure with Half H-Bridge Module for Industrial Applications Ersoy BEŞER, Esra KANDEMİR BEŞER	035202 (579-585)

Araştırma Makalesi / Research Article Çok Modlu Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemlerinin Belirsizlik Ortamında Modellenmesi Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Under Fuzzy Enviroment Ömer ATLI, Serhat AYDIN	035301 (586-605)
--	-------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article Taşınmaz Yönetiminde Arsa Rayıç Değerindeki Zamansal Değişimin Konumsal Analiz Teknikleri ile İncelenmesi Investigating the Temporal Change of Land Market Value By Spatial Analysis Techniques Arif Çağdaş AYDINOĞLU, Süleyman ŞİŞMAN, Yasemin YILMAZ	035501 (606-619)
Araştırma Makalesi / Research Article Yeraltı Suyu Seviyesi Değişikliğinin Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile İzlenmesi, Konya Altınekin Havzası Örneği Monitoring of Groundwater Level Change with Geographical Information System (GIS), The Case of Konya Altınekin Basin S. Savaş DURDURAN, Aslı BOZDAĞ, Cafer Tayyar OKKA, Tansu ALKAN	035502 (620-631)
Araştırma Makalesi / Research Article Kitle Kaynaklı Fotoğraflar Kullanılarak Kültürel Mirasın Üç Boyutlu Modellenmesi ve Web Tabanlı Görselleştirilmesi: Afrodisias - Tetrapylon Örneği Three-Dimensional Modeling and Web-Based Visualization of Cultural Heritage Using Crowdsourced Photos: The Case of Aphrodisias – Tetrapylon Ahmet USLU, Murat UYSAL	035503 (632-639)
Araştırma Makalesi / Research Article Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Uygulamalarında Kamera ve Sistem Kalibrasyonunun Ölçüm Doğruluklarına Etkisi Camera and System Calibration Effects on Measurement Accuracies in Photogrammetric Surgical Navigation Applications Temel DURGUT, Erdem Emin MARAŞ	035504 (640-649)

Araştırma Makalesi / Research Article Yığma Yapılarda Kullanılan Kenetlerin Yapı Davranışına Etkilerinin İncelenmesi Investigation of the Effects of Clamps Used in Masonry Structures on Building Behavior Tülin ÇELİK, Şükran TANRIVERDİ, Ali URAL, Fatih Kürşat FIRAT	035601 (650-659)
Araştırma Makalesi / Research Article Kazınmış Asfalt Malzemelerin İri Agrega Yerine Kısmen İkame Edilmesinin Farklı Isı Altındaki Betonların Basınç Dayanımlarına Etkisi The Effect of Partial Replacement of Scraped Asphalt Pavements by Coarse Aggregate on the Compressive Strength of Concrete Under Various Temperatures Mehmet Fatih ŞAHAN, Aysun Dilan POLAT, Osman GÜNAYDIN	035602 (660-667)
Araştırma Makalesi / Research Article Düşük Plastisiteli Killi Zeminlerin Kıvam Özelliklerinin Tahmininde Rastgele Orman Yöntemi The Random Forest Method to Predict the Consistency Characteristics of Low Plastic Clayey Soils Zülal AKBAY ARAMA, Seyidcem KARAKAŞ, Said Enes NURAY, Oğuzhan ALTEN, Muhammed Selahaddin AKIN, Hazal Berrak GENÇDAL	035603 (668-680)
Araştırma Makalesi / Research Article Muhtelif Parametreler Işığında Üstgeçit/Altgeçit Mukayesesi: Karabük-Safranbolu Örneği Comparison of Overpass / Underpass in the Light of Various Parameters: Karabuk-Safranbolu Case Study Halil İbrahim YUMRUTAŞ, Şeyda Çınar SARISOY	035604 (681-695)

Araştırma Makalesi / Research Article AA6061-B ₄ C MMK _p Malzemelerin Özelliklerine Süper Katı Üzeri Sıvı Faz Sinterleme İşlemlerinin Etkisi The Effect of Super Solidus Liquid-Phase Sintering Processes on Properties of AA6061-B ₄ C MMK _p Materials Yusuf ÖZÇATALBAŞ, Deniz KÖSE	035701 (696-709)
Araştırma Makalesi / Research Article Başlangıç Presleme Basıncının Düşük Gözenekli Ti3Al'nin Üretimine Etkisi The Effect of Initial Compacting Pressure on the Production of Ti3Al with Low Porosity Neşe ÖZTÜRK KÖRPE, M. Hakan KARAAŞ, Gökçe KILIÇ	035702 (710-717)

<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Stronsiyum Master Alaşım Takviyesinin Galfan (%95 Zn, %5 Al) Mikro Yapısı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi</p> <p>Investigation of Strontium Master Alloy Addition Effect to Galfan (%95 Zn, %5 Al) Microstructure</p> <p>Erkan KARAYİĞİT, Mustafa ŞENYEL, Barış GÜNAY</p>	<p>035703 (718-723)</p>
--	--------------------------------

MAKİNE , İMALAT & OTOMOTİV / MACHINERY, MANUFACTURING & AUTOMOTIVE (59)

<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Kesiklerin Bazalt / Karbon Hibrit Kompozitlerin Serbest Titreşim Tepkisine Etkileri</p> <p>Effect of Cut-outs on the Free Vibration Response of Basalt/Carbon Hybrid Composites</p> <p>Özkan ÖZBEK, Yüksel TOKUR BOZKURT</p>	<p>035901 (724-734)</p>
<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Montmorillonite Kilinin HDPE/ HGS Kompozitlerinin Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi</p> <p>Effect of Montmorillonite Clay on Physical Properties of HDPE/ HGS Composites</p> <p>Beril GÜMÜŞ</p>	<p>035902 (735-744)</p>
<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>SiC, cBN ve GaN'ün Spektral-Seçici Nano-Optik Uygulamalar İçin Polaritonik Performanslarının Belirlenmesi</p> <p>Polaritonic Behaviors of SiC, cBN and GaN for Spectrally-Selective Nano-Optics Applications</p> <p>Elif Begüm ELÇİOĞLU</p>	<p>035903 (745-754)</p>

DİSİPLİNLER ARASI / INTER DISCIPLINARY (71)

<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Erozif Aşınma Testlerinde Farklı Nozul Tasarımlarının PMMA Üzerinde Aşınma İzi Alanı ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi</p> <p>Investigation of the Effects of Different Nozzle Geometries at Erosive Wear Tests on the Wear Track Area and Surface Roughness of PMMA</p> <p>Barış ÖNEN, Ekrem ALTUNCU, Ali ÇINAR</p>	<p>037101 (755-763)</p>
--	--------------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article

Balıkesir Kıyı Kumullarındaki Bitki Çeşitliliği ve Tehdit Faktörleri

Fatih SATIL¹, Gülendam TÜMEN², Selami SELVİ^{3*}¹Balıkesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Çağış Yerleşkesi, 10145, Balıkesir²TOKİ Yenimahalle, Karesi/Balıkesir³Balıkesir Üniversitesi, Altınoluk Meslek Yüksekokulu, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Programı, 10870, Balıkesir

Sorumlu yazar, e-posta: sselvi2000@yahoo.com

fsatil@gmail.com

gultumen@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9959-6945>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4938-1161>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7457-3341>

Geliş Tarihi: 03.03.2021

Kabul Tarihi: 13.06.2021

Öz

Türkiye'nin 23 ilinde toplam 105 kıyı kumulu bulunmaktadır. Bu kumullarından 8'i Balıkesir ili sınırlarında yer almaktadır. Bu çalışma, 2016-2018 yıllarında Balıkesir' in Armutova, Çoruk, Belkis Tombolosu ve Karabiga kıyı kumullarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, daha önce çalışılan Ayvalık ve Gönen kumulları ile birlikte değerlendirilerek Balıkesir'deki 8 kumul alanın florası ortaya konmuştur. Floristik çalışmalar sonucunda alanda; 39 familyaya ait 120 cins ve 152 takson teşhis edilmiştir. Teşhisi yapılan türlerin 2'si Pteridophyta diviziyosuna, 150' si ise Spermatophyta diviziyosuna aittir. Spermatophyta diviziyosuna ait taksonların tümü Angiospermae alt diviziyosuna aittir. Angiospermae alt diviziyosundan 134 tür Dicotyledonae, 16 tür ise Monocotyledonae sınıfına aittir. Tespit edilen bitki taksonlarından %35'lik kısmı (54 takson) Akdeniz, %4 (6 takson) Avrupa-Sibirya fitocoğrafik bölgesine ve %61'lik (92 takson) kısmı da fitocoğrafik bölgesi tespit edilemeyen türlerden oluşmaktadır. Bölgedeki kumul alanların karakteristik florasında en çok takson içeren ilk üç familya; Asteraceae, Fabaceae ve Poaceae'dir. Kumul alanlarda en fazla taksona sahip olan cinsler, *Plantago* ve *Limonium* olup bunları *Allium* ve *Juncus* cinsleri takip etmektedir. Bütün araştırma alanlarımızda görülen en yaygın taksonlar ise *Cakile maritima*, *Glaucium flavum* ve *Eryngium maritimum*'dur. Çalışma alanında 1 endemik takson tespit edilmiştir. Endemik *Trigonella coerulea* subsp. *ayvalikensis*'in doğal habitatı olan Sarımsaklı plajı turizm faaliyetleri nedeniyle yoğun insan baskısı altındadır. Ayrıca, kumul alanlarda görülen *Pancreaticum maritimum*'un doğal habitatlarından halk tarafından sökülmesi ve yayılış alanında plaj düzenlemesi gibi nedenlerle habitat bozulmaları türün popülasyonunu azaltmıştır. Bunların dışında, sanayi ve kanalizasyon sularının arıtılmadan denize akıtılması, kıyıya yakın tarımsal faaliyetler, çöp atma ve kıyılardan kumul alımı gibi faaliyetler bölgedeki kumul habitatlar için önemli tehdit unsurlarıdır.

Anahtar kelimeler

Balıkesir; Biyoçeşitlilik;
Ekoloji; Flora; Halofit;
Kumul

Plant Diversity and Threat Factors in the Coastal Dunes of Balıkesir

Abstract

There are a total of 105 dunes in 23 provinces of Turkey. 8 of these coastal dunes are located within the borders of Balıkesir province. This study was carried out in Armutova, Çoruk, Belkis Tombolos and Karabiga coastal dunes located on the coasts of Balıkesir between 2016-2018. The obtained results were evaluated together with the Ayvalık and Gönen dunes previously studied, and the flora of 8 dune areas in Balıkesir was revealed. As a result of floristic studies; 120 genera and 152 taxa belonging to 39 families were identified. 2 of the species diagnosed are belonging to Pteridophyta diviso and 150 species belonging to Spermatophyta divisio. All of the taxa belonging to the Spermatophyta division belong to the Angiospermae subdivision. Of the Angiospermae subdivision, 134 species belong to the Dicotyledonae and 16 species belong to the Monocotyledonae class. Of the identified plant taxa, 35% (54 taxa) consists of Mediterranean, 4% (6 taxa) to the European-Siberian phytogeographical region and 61% (92 taxa) of the species whose phytogeographical region can't be determined. The first three families that contain the most taxa in the characteristic flora of the dune areas in the region; Asteraceae, Fabaceae and Poaceae. The most common taxa in dune areas are belong to genera *Plantago* and *Limonium*, followed by *Allium* and *Juncus*. The most common taxa seen in all our research areas are *Cakile maritima*, *Glaucium flavum*, and *Eryngium maritimum*. One endemic taxon has been identified in the study area. Sarımsaklı beach, which is the natural habitat of the endemic taxon *Trigonella coerulea* subsp. *ayvalikensis*, is under heavy human pressure due to tourism activities. In addition,

Keywords

Balıkesir; Biodiversity;
Ecology; Flora;
Halophyte; Dune

habitat degradation has decreased the population of the species due to reasons such as the removal of *Pancretium maritimum* from its natural habitats by the public and beach arrangement in the area of distribution. Apart from these, activities such as pouring industrial and sewage water into the sea without treatment, agricultural activities close to the shore, garbage disposal and taking sand from the coasts are important threats to the dune habitats in the region.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

Deniz ve kara ekosistemlerinin kesiştikleri geçiş bölgeleri olan kıyı ekosistemleri, biyoçeşitlilik ve deniz ile kara arasındaki dengeyi sağlaması bakımından önemli görevleri olan kumul alanlardır. Bu nedenle kıyılar, su ortamları ile karasal ortamlar arasında kendilerine özgü ekolojik özellikler taşıyan gerçek ekotonlar olarak bilinirler. Yeryüzünün sadece %4'ünü meydana getiren kıyı alanları, dünya nüfusunun yaklaşık 1/3'ünü barındırmaktadır (Demiriz, 1969; Odum ve Barrett; 2008; Avcı, 2017a,b,c). Kıyı kumulları bitki örtüsünün yetişme koşulları bakımından oldukça karmaşık habitatlardır. Bu alanların yüksek geçirgenliği ve bitki besin maddelerince fakir olması, doğrudan güneş ışığına maruz kalması, yüksek sıcaklık ve şiddetli rüzgâr gibi iklimsel faktörlere maruz kalması, yüzey hareketliliği ve denizden gelen ve yüksek oranda tuz içeren deniz suyuna maruz kalması gibi nedenler, kumullarda bitki örtüsünün gelişimini sınırlayan en önemli faktörlerdir.

Kumul alanlar, dünya üzerinde çok az ve dar alanlar olması nedeniyle doğa koruma açısından son derece değerli yaşam ortamları olarak kabul edilmektedirler. Ayrıca bu alanlar, yalnız kıyı şeridinde bulunan nadir ve nesli tükenme tehlikesi altındaki bitki ve hayvan türlerinin korunması açısından da hayati bir öneme sahiptirler (Özhatay ve Byfield, 1996).

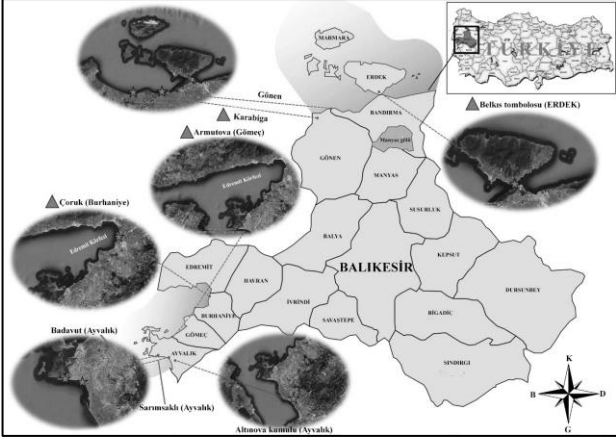
Türkiye'nin 23 ilinde toplam 105 kıyı kumulu bulunmaktadır. Kıyı kumul florasının oldukça zengin olduğu ülkemizde kumulların toplam uzunluğu 8333 km'dir (Uslu 1988, Avcı vd. 2015). Erinç'e göre (2001); Türkiye'deki kumullarından 8'i Balıkesir ili sınırlarında yer almaktadır. Balıkesir'deki bu kumulların üçü Ayvalık ilçesinde (Altınova, Sarımsaklı ve Badavut), ikisi Gönen'de (Gönen ve Karabiga deltaları), diğerleri ise Gömeç (Armutova), Edremit/Burhaniye (Çoruk) ve Erdek (Belkıs Tombolosu)'te yer alır. Bu kumullardan Ayvalık ve

Gönen floraları tarafımızdan incelenmiştir (Satıl vd. 2019a,b). Ancak Balıkesir'de yer alan Armutova, Çoruk, Belkıs Tombolosu ve Karabiga deltası kumul alanlarının florası ile ilgili bugüne kadar herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bunun dışında sadece bölgede Balıkesir-İzmir arasında kalan Edremit Körfezi-Gökova Körfezi arası alanın florası (Akyol ve Gemici 2017), Karaburun-Akdağ çevresinin flora ve vejetasyonu (Bekat 1980) ile Foça, Aliğa ve Çandarlı bölgesini vejetasyonu (Bekat ve Seçmen 1988) ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Gökova ve Edremit Körfezleri arasında kalan Ege kıyılarının vejetasyon ekolojisini ve biyolojik çeşitliliğini çalışan Akyol ve Gemici (2017) alanda toplam 5 vejetasyon tipi ve 12 bitki birliği belirlemiştir. Ancak bu çalışmada saha ile ilgili bir floristik liste ortaya konmamıştır.

Bu çalışma ile Balıkesir ilinde daha önce çalışılmamış (Armutova, Çoruk, Belkıs Tombolosu ve Karabiga) 4 kıyı kumul alanının bitki çeşitliliği tespit edilmiştir. Ayrıca, daha önce çalışılan Ayvalık ve Gönen floraları ile de karşılaştırılmıştır. Böylece Balıkesir'in tüm kumul florası ortaya konması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma, 2016-2018 yılları arasında Balıkesir sınırlarındaki 4 kıyı kumul alanında (Armutova, Çoruk, Belkıs Tombolosu ve Karabiga deltası) gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Ayrıca çalışmada, daha önce ekibimizce çalışılan Ayvalık ve Gönen kumul florası verileri de kullanılmıştır (Satıl vd. 2019 a,b).



Şekil 1. Balıkesir kıyı kumul alanları (Bu çalışmada incelenen alanlar (▲) ile gösterilmiştir).

Dört mevsim arazi çalışmaları sonucunda floristik ve ekolojik gözlemler yapılarak alanların bitki çeşitliliği tespit edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Balıkesir kıyı kumullarından genel görüntüler. A: Sarımsaklı (Ayvalık), B: Badavut (Ayvalık), C: Altınova (Ayvalık), D: Armutova (Gömeç), E: Çoruk (Edremit/Burhaniye), F: Belkıs Tombolosu (Erdek), G: Gönen, H: Karabiga.

Floristik çalışmalar sonucunda, alandaki kumul ve tuzcul bitki taksonları toplanmış, alan fotoğrafları çekilmiş ve herbaryum materyalleri haline getirilmişlerdir. Tespit edilen bitki örnekleri GT 960-1675 arasını kapsayan toplayıcı numarası ile Balıkesir Üniversitesi, Altınoluk Meslek Yüksekokulu Botanik Laboratuvarında muhafaza edilmektedir. Toplanan bitkilerin teşhisinde başta “Flora of Turkey” olmak üzere “Mountain Flora of Greece”, “Flora of Europae” ve bölgede yapılan diğer floristik

çalışmalardan yararlanılmıştır (Tutin vd. 1964-1980, Davis 1965-1985; Davis vd. 1988, Strid ve Tan 1991, Güner vd. 2000, Güner vd. 2012). Çalışmada tespit edilen taksonların Türkçe isimleri Güner vd. (2012)’a göre, güncel bilimsel isimleri Catalogue of Life’a (Roskov vd. 2019) ve taksonların otör adları Authors of Plants Name adlı eserle karşılaştırılmış ve otör isimleri kısaltılmıştır (Brummit ve Powel, 1992). Ayrıca taksonların tehlike kategorilerinin belirlenmesinde Ekim ve ark. (2000) ile IUCN (2019) den faydalanılmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışmada Balıkesir ilinde yer alan Armutova, Erdek, Çoruk ve Karabiga kıyı kumulları floristik açıdan incelenmiştir. Ayrıca daha önce ekibimizce çalışılan Ayvalık ve Gönen kumul florası verileri de bu çalışmada kullanılarak böylece Balıkesir’deki tüm kumul alanların flora listesi karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur (Çizelge 1). Floristik çalışmalar sonucunda alanda; 39 familyaya ait 120 cins ve 152 takson tespit edilmiştir. Çizelge 1’de Balıkesir kumullarında yayılış gösteren bu taksonlar, yayılış gösterdiği kumul alanlar ve fitocoğrafik elementleri familya bazında alfabetik olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Balıkesir kıyı kumullarında tespit edilen taksonlar.

No	Familiya	Takson	Türkçe isim	*Ayvalık ¹⁻³	*Gönen	**Armutova	**Çoruk	**Belkis	**Karabiga	Fitocoğrafik element
1	Amaranthaceae	<i>Amaranthus viridis</i> L.	Yeşilibik	+	-	+(GT1278)	+(GT1165)	-	-	Bilinmiyor
2	Amaranthaceae	<i>Atriplex lasiantha</i> Boiss.	Delionluca	+	-	+(GT1300)	+(GT1111)	+(GT1102)	-	Bilinmiyor
3	Amaranthaceae	<i>Beta maritima</i> L. var. <i>maritima</i>	Kıyıpancarı	+	+	+(GT1160)	+(GT1486)	+(GT1238)	+(GT1100)	Bilinmiyor
4	Amaranthaceae	<i>Chenopodium murale</i> L.	Salmanca	-	+	+(GT1101)	+(GT1599)	+(GT1380)	+(GT1155)	Bilinmiyor
5	Amaranthaceae	<i>Halimione portulacoides</i> (L.) Aellen	Kocabetne	+	+	+(GT1200)	+(GT1175)	+(GT1476)	+(GT1113)	Bilinmiyor
6	Amaranthaceae	<i>Salicornia emericii</i> Duval-Jouve	Denizbörülcesi	+	-	+(GT1211)	+(GT1191)	-	-	Bilinmiyor
7	Amaranthaceae	<i>Salsola kali</i> L.	Döngel	+	+	+(GT1060)	+(GT1531)	+(GT1170)	+(GT1212)	Bilinmiyor
8	Amaranthaceae	<i>Salsola soda</i> L.	Denizfasülyesi	+	+	+(GT1107)	+(GT1600)	+(GT1118)	+(GT1020)	Bilinmiyor
9	Amaranthaceae	<i>Suaeda prostrata</i> Pall.	Yatıkçirim	+	+	+(GT1566)	+(GT960)	+(GT1086)	+(GT1661)	Bilinmiyor
10	Amaranthaceae	<i>Suaeda altissima</i> Pall.	Cirimotu	-	-	-	-	+(GT1660)	+(GT1201)	Bilinmiyor
11	Amaryllidaceae	<i>Allium ampeloprasum</i> L.	Pırasa	+	-	+(GT1103)	+(GT1675)	+(GT1012)	-	Akdeniz
12	Amaryllidaceae	<i>Allium commutatum</i> Guss.	İtirdişeği	+	+	+(GT1031)	+(GT1000)	+(GT1243)	+(GT1466)	Akdeniz
13	Amaryllidaceae	<i>Allium roseum</i> L. subsp. <i>roseum</i>	Gülsoğanı	+	+	+(GT1642)	+(GT1112)	+(GT1180)	+(GT1150)	Akdeniz
14	Amaryllidaceae	<i>Allium sphaerocephalon</i> L.	Yılsarmsıağı	+	-	+(GT1375)	-	+(GT1550)	-	Avrupa-Sibirya
15	Amaryllidaceae	<i>Narcissus tazetta</i> L. subsp. <i>tazetta</i>	Nergis	+	+	+(GT1087)	+(GT961)	-	-	Bilinmiyor
16	Amaryllidaceae	<i>Pancreatum maritimum</i> L.	Kumzambağı	+	+	+(GT1641)	+(GT1598)	+(GT1237)	+(GT1307)	Akdeniz
17	Anacardiaceae	<i>Pistacia lentiscus</i> L.	Sakızağacı	+	-	-	-	-	-	Akdeniz
18	Apiaceae	<i>Bunium ferulaceum</i> Sibth. & Sm.	İncirop	-	+	-	-	-	+(GT1565)	Akdeniz
19	Apiaceae	<i>Cachrys cristata</i> DC.	Tepeliçarşambaotu	-	+	-	-	+(GT1530)	+(GT1630)	Akdeniz
20	Apiaceae	<i>Critimum maritimum</i> L.	Nerizteresi	+	+	+(GT1085)	+(GT1108)	+(GT1659)	+(GT1662)	Bilinmiyor
21	Apiaceae	<i>Eryngium maritimum</i> L.	Kumboğadikeni	+	+	+(GT1121)	+(GT1567)	+(GT1244)	+(GT1011)	Bilinmiyor
22	Apiaceae	<i>Ferula communis</i> L. subsp. <i>communis</i>	atkasnağı	-	-	-	-	+(GT1456)	+(GT1385)	Akdeniz
23	Apiaceae	<i>Oenanthe pimpinelloides</i> L.	Delimaydanoz	-	+	-	-	-	+(GT1239)	Bilinmiyor
24	Apocynaceae	<i>Cynanchum acutum</i> L. subsp. <i>acutum</i>	Bacırgan	+	+	+(GT1181)	+(GT1117)	+(GT1185)	+(GT1123)	Bilinmiyor
25	Apocynaceae	<i>Cionura erecta</i> (L.) Griseb.	Babrik	-	+	-	-	+(GT1084)	-	Bilinmiyor
26	Araceae	<i>Arum italicum</i> Mill.	Domuzlahanası	-	+	+(GT1132)	+(GT1122)	+(GT1213)	-	Bilinmiyor
27	Asparagaceae	<i>Ornithogalum pyrenaicum</i> L.	Eşeksusamı	-	+	-	+(GT1190)	+(GT1370)	+(GT1145)	Bilinmiyor
28	Asparagaceae	<i>Prospero autumnale</i> (L.) Speta	Güzsümbülü	-	+	+(GT1195)	+(GT1297)	+(GT1021)	+(GT1532)	Akdeniz
29	Asteraceae	<i>Achillea maritima</i> (L.) Ehrend. & Y.P.Guo	Çocukotu	+	-	-	-	+(GT1128)	+(GT1549)	Akdeniz
30	Asteraceae	<i>Anthemis rigida</i> (Sibth. & Sm.) Boiss.	Diripapatya	+	-	+(GT1088)	+(GT1133)	+(GT1597)	+(GT1568)	Akdeniz
31	Asteraceae	<i>Anthemis tomentosa</i> L. subsp. <i>tomentosa</i>	Sahilpapatyası	+	-	+(GT1236)	+(GT1083)	+(GT1242)	-	Akdeniz
32	Asteraceae	<i>Artemisia santonicum</i> L. subsp. <i>santonicum</i>	Denizyavşanı	+	+	+(GT1601)	+(GT1564)	+(GT1658)	+(GT1059)	Bilinmiyor
33	Asteraceae	<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	Sarıtop	-	+	+(GT1032)	+(GT1131)	+(GT1013)	+(GT1631)	Akdeniz
34	Asteraceae	<i>Bellis annua</i> L.	Akbubeçlik	+	+	+(GT1640)	+(GT1061)	+(GT1241)	+(GT1663)	Akdeniz
35	Asteraceae	<i>Cardopatum corymbosum</i> (L.) Pers.	Kurtludiken	+	+	+(GT1202)	+(GT1620)	+(GT1533)	+(GT1602)	Akdeniz
36	Asteraceae	<i>Carduus acicularis</i> Bertol.	Sivrikangal	-	+	-	-	-	+(GT1529)	Akdeniz
37	Asteraceae	<i>Carlina gummifera</i> (L.) Less.	Sakızkeyganası	-	+	-	-	+(GT1287)	+(GT1548)	Akdeniz
38	Asteraceae	<i>Carthamus caeruleus</i> L.	Gökaspır	+	-	-	-	-	-	Bilinmiyor
39	Asteraceae	<i>Centaurea spinosa</i> L. var. <i>spinosa</i>	Denizgeveni	-	+	-	-	+(GT1082)	+(GT1142)	Bilinmiyor
40	Asteraceae	<i>Cladanthus mixtus</i> (L.) Oberpr. & Vogt	Çirozpatatya	+	-	-	-	-	-	Akdeniz
41	Asteraceae	<i>Cota altissima</i> (L.) J.Gay	Köpekpatatyası	+	-	+(GT1214)	+(GT1203)	+(GT1138)	-	Bilinmiyor

42	Asteraceae	<i>Cota tinctoria</i> (L.) J.Gay var. <i>tinctoria</i>	Boyacıpapatyası	+	-	+(GT1141)	+(GT1446)	+(GT1390)	+(GT1569)	Bilinmiyor
43	Asteraceae	<i>Crepis commutata</i> (Spreng.) Greuter	Delikiskıs	+	+	+(GT1062)	+(GT1619)	+(GT1081)	+(GT1365)	Bilinmiyor
44	Asteraceae	<i>Hedypnois rhagadioloides</i> (L.) F.W.Schmidt	Sünnetlice	+	+	+(GT1240)	+(GT1563)	+(GT1528)	+(GT1325)	Akdeniz
45	Asteraceae	<i>Helichrysum orientale</i> (L.) Gaertn.	Sarısolmaz	+	+	-	-	+(GT1534)	+(GT1547)	Bilinmiyor
46	Asteraceae	<i>Helminthotheca echioides</i> (L.) Holub	Billurdüğme	+	+	+(GT1089)	+(GT1022)	+(GT1603)	+(GT1596)	Bilinmiyor
47	Asteraceae	<i>Hypochaeris achyrophorus</i> L.	Sarıhindiba	-	+	-	+(GT1235)	+(GT1349)	+(GT1140)	Akdeniz
48	Asteraceae	<i>Hypochaeris glabra</i> L.	Cıbıldağmarulu	-	+	-	-	-	-	Akdeniz
49	Asteraceae	<i>Inula graveolens</i> (L.) Desf.	Delisarıot	-	+	-	-	+(GT1049)	+(GT1300)	Akdeniz
50	Asteraceae	<i>Senecio vernalis</i> Waldst. & Kit.	Kanaryaotu	+	+	+(GT1436)	+(GT1151)	+(GT1546)	+(GT1326)	Bilinmiyor
51	Asteraceae	<i>Tripolium pannonicum</i> (Jacq.) Dobrocz.	Bataklıkpapatyası	-	+	-	-	+(GT1204)	+(GT1058)	Avrupa-Sibirya
52	Asteraceae	<i>Xanthium strumarium</i> L. subsp. <i>strumarium</i>	Kocacıtrak	+	+	+(GT1143)	+(GT963)	+(GT1080)	+(GT1277)	Bilinmiyor
53	Boraginaceae	<i>Echium angustifolium</i> Mill.	Agres	+	+	+(GT1215)	+(GT1570)	+(GT1148)	+(GT1535)	Akdeniz
54	Brassicaceae	<i>Alyssum umbellatum</i> Desv.	Şişkinkevke	+	-	+(GT1127)	+(GT1360)	+(GT1161)	+(GT1618)	Akdeniz
55	Brassicaceae	<i>Cakile maritima</i> Scop.	Kumteresi	+	+	+(GT1033)	+(GT1426)	+(GT1014)	+(GT964)	Bilinmiyor
56	Brassicaceae	<i>Eruca vesicaria</i> (L.) Cav.	Roka	+	+	+(GT1643)	+(GT1193)	+(GT1090)	+(GT1023)	Bilinmiyor
57	Brassicaceae	<i>Malcolmia flexuosa</i> (Sibth. & Sm.) Sibth.	Kayaşebboyu	+	+	+(GT1395)	-	-	-	Akdeniz
58	Brassicaceae	<i>Matthiola sinuata</i> (L.) R.Br.	Oyalışebboy	+	+	+(GT1079)	+(GT1063)	+(GT1324)	+(GT1632)	Bilinmiyor
59	Brassicaceae	<i>Matthiola tricuspidata</i> (L.) R.Br.	Öküzşebboyu	+	+	+(GT1496)	+(GT1158)	+(GT1015)	+(GT1664)	Akdeniz
60	Brassicaceae	<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	Eşekturpu	+	+	+(GT1571)	+(GT1527)	+(GT1245)	+(GT1135)	Bilinmiyor
61	Brassicaceae	<i>Rapistrum rugosum</i> (L.) All.	Kediturpu	-	+	+(GT1048)	+(GT1216)	+(GT1562)	+(GT1526)	Bilinmiyor
62	Campanulaceae	<i>Jasione montana</i> L. subsp. <i>montana</i>	Dağgökçesi	+	+	-	-	+(GT1595)	-	Bilinmiyor
63	Caryophyllaceae	<i>Arenaria serpyllifolia</i> L.	Kurukumotu	+	-	+(GT1617)	-	+(GT1617)	+(GT1171)	Bilinmiyor
64	Caryophyllaceae	<i>Paronychia echinulata</i> Chater	Kıyıkepekotu	+	-	-	-	+(GT1348)	-	Akdeniz
65	Caryophyllaceae	<i>Sagina maritima</i> G.Don	Arsızsaginotu	+	+	+(GT1400)	+(GT1323)	+(GT1572)	+(GT1057)	Bilinmiyor
66	Caryophyllaceae	<i>Silene behen</i> L.	Akkıvşak	+	-	+(GT1153)	+(GT1301)	+(GT1657)	+(GT1350)	Bilinmiyor
67	Caryophyllaceae	<i>Silene gallica</i> L.	Serçeçiçeği	+	-	+(GT1205)	+(GT1233)	+(GT1016)	+(GT1267)	Bilinmiyor
68	Caryophyllaceae	<i>Spergula arvensis</i> L.	Tarlakişnişi	+	+	+(GT1416)	+(GT1545)	+(GT1064)	+(GT1024)	Bilinmiyor
69	Caryophyllaceae	<i>Spergularia marina</i> (L.) Besser	Sahilremilotu	+	+	+(GT1034)	+(GT1506)	+(GT1536)	+(GT1665)	Bilinmiyor
70	Caryophyllaceae	<i>Silene fabaria</i> Sibth. & Sm.	Kösenakıl	-	+	+(GT1234)	+(GT978)	+(GT1246)	+(GT1633)	Bilinmiyor
71	Cistaceae	<i>Tuberaria guttata</i> (L.) Fourr.	Karagözgülü	-	+	-	-	+(GT1405)	+(GT1065)	Bilinmiyor
72	Convolvulaceae	<i>Calystegia soldanella</i> (L.) R.Br.	Kumsarmaşığı	-	+	+(GT1604)	+(GT1001)	+(GT1217)	+(GT1525)	Bilinmiyor
73	Convolvulaceae	<i>Cressa cretica</i> L.	Reçineçiçeği	+	-	+(GT1137)	+(GT965)	-	-	Bilinmiyor
74	Crassulaceae	<i>Sedum litoreum</i> Guss. var. <i>litoreum</i>	Kıyıkoruğu	+	+	+(GT1174)	+(GT1035)	+(GT1163)	+(GT1347)	Akdeniz
75	Cucurbitaceae	<i>Bryonia alba</i> L.	Akhaylin	-	-	-	-	-	+(GT1516)	Avrupa-Sibirya
76	Cyperaceae	<i>Bolboschoenus maritimus</i> (L.) Palla	Sandalyesazı	+	+	+(GT1302)	+(GT1066)	+(GT1168)	+(GT1130)	Bilinmiyor
77	Cyperaceae	<i>Carex muricata</i> L. subsp. <i>muricata</i>	Çengelsazı	+	-	+(GT1078)	+(GT1047)	+(GT1594)	-	Avrupa-Sibirya
78	Cyperaceae	<i>Cyperus capitatus</i> Vand.	Şehvetotu	+	-	+(GT1616)	+(GT1147)	+(GT1206)	-	Bilinmiyor
79	Cyperaceae	<i>Eleocharis palustris</i> (L.) Roem. & Schult.	Delisaz	+	-	+(GT1639)	+(GT1003)	+(GT1257)	-	Bilinmiyor
80	Cyperaceae	<i>Scirpoides holoschoenus</i> (L.) Soják	Vurla	+	-	+(GT1593)	+(GT1355)	+(GT1544)	-	Bilinmiyor
81	Equisetaceae	<i>Equisetum telmateia</i> Ehrh.	Deredoruk	-	-	-	-	+(GT1178)	+(GT1327)	Bilinmiyor
82	Euphorbiaceae	<i>Euphorbia paralias</i> L.	Kumsütleşeni	+	+	+(GT1573)	+(GT1002)	+(GT1250)	+(GT1537)	Akdeniz
83	Euphorbiaceae	<i>Euphorbia peplis</i> L.	Kıyısütleşeni	+	+	+(GT1077)	+(GT1674)	+(GT1656)	+(GT1056)	Akdeniz
84	Fabaceae	<i>Hippocrepis unisiliquosa</i> L.	Atnalı	+	-	+(GT1339)	+(GT1605)	+(GT1251)	-	Bilinmiyor
85	Fabaceae	<i>Hymenocarpus circinnatus</i> (L.) Savi	Pulluot	+	-	+(GT1561)	+(GT1303)	+(GT1524)	-	Bilinmiyor
86	Fabaceae	<i>Lotus corniculatus</i> L. var. <i>corniculatus</i>	Gazalboynuzu	+	-	+(GT977)	+(GT1346)	+(GT1410)	-	Bilinmiyor

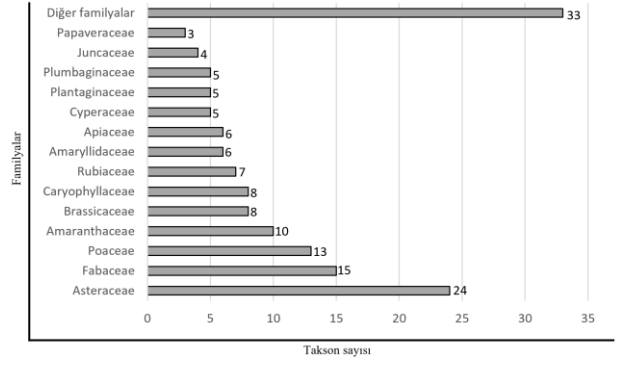
87	Fabaceae	<i>Lotus ornithopodioides</i> L.	Civcivayağı	+	-	+(GT1615)	+(GT1157)	+(GT1218)	-	Akdeniz
88	Fabaceae	<i>Lupinus angustifolius</i> L. subsp.	Yahudibaklası	+	-	+(GT966)	+(GT1574)	-	-	Bilinmiyor
89	Fabaceae	<i>Lupinus angustifolius</i> L. subsp. <i>angustifolius</i>	Acıbakla	+	-	+(GT1036)	+(GT1188)	+(GT1207)	+(GT1328)	Bilinmiyor
90	Fabaceae	<i>Medicago marina</i> L.	Sahilyoncasi	+	+	+(GT1523)	+(GT1232)	+(GT1025)	+(GT1345)	Bilinmiyor
91	Fabaceae	<i>Medicago orbicularis</i> (L.) Bartal.	Paralık	+	-	+(GT1076)	+(GT1345)	+(GT1046)	+(GT1543)	Bilinmiyor
92	Fabaceae	<i>Onobrychis caput-galli</i> (L.) Lam.	Pıtrakkorunga	+	-	+(GT1322)	+(GT1247)	+(GT1538)	+(GT1125)	Akdeniz
93	Fabaceae	<i>Ornithopus compressus</i> L.	Kuşayağı	+	-	+(GT1338)	+(GT1592)	-	-	Akdeniz
94	Fabaceae	<i>Scorpiurus subvillosus</i> L. var. <i>subvillosus</i> L.	Koyundüğü	+	-	+(GT1167)	+(GT1575)	+(GT1173)	+(GT1231)	Bilinmiyor
95	Fabaceae	<i>Trifolium repens</i> L. var. <i>repens</i>	Aküçgül	+	-	+(GT1542)	+(GT1304)	+(GT1198)	+(GT1055)	Bilinmiyor
96	Fabaceae	<i>Trifolium subterraneum</i> L.	Yeraltıtüçgülü	+	-	+(GT1184)	+(GT1208)	+(GT1606)	+(GT1340)	Bilinmiyor
97	Fabaceae	<i>Trigonella coerulescens</i> (M.Bieb.) Halácsy subsp. <i>ayvalikensis</i> Erdoğan Selvi& Tümen (E)	Ayvalıkçemeni	+	-	-	-	-	-	Bilinmiyor
98	Fabaceae	<i>Vicia villosa</i> Roth. subsp. <i>eriocarpa</i> P.W.Ball	Boğala	+	-	+(GT1067)	+(GT1183)	+(GT1415)	-	Bilinmiyor
99	Frankeniaceae	<i>Frankenia hirsuta</i> L.	Tülpe	+	+	-	-	-	-	Bilinmiyor
100	Gentianaceae	<i>Centaurium maritimum</i> (L.) Fritsch	Sarıgelindüğü	+	+	+(GT1321)	+(GT1219)	+(GT1539)	+(GT1591)	Akdeniz
101	Geraniaceae	<i>Erodium acaule</i> (L.) Becherer & Thell.	Leylekğagası	+	+	+(GT1560)	+(GT1177)	+(GT1305)	+(GT1329)	Akdeniz
102	Geraniaceae	<i>Geranium molle</i> L.	Yumuşaktır	+	+	+(GT1614)	+(GT1522)	+(GT1655)	+(GT1634)	Bilinmiyor
103	Juncaceae	<i>Juncus acutus</i> L. subsp. <i>acutus</i>	Kofa	+	+	+(GT1037)	+(GT1344)	+(GT1335)	+(GT1068)	Bilinmiyor
104	Juncaceae	<i>Juncus bufonius</i> L.	Kamır	-	+	+(GT1644)	+(GT1208)	+(GT1220)	+(GT1026)	Bilinmiyor
105	Juncaceae	<i>Juncus capitatus</i> Weigel	Topakkofa	+	+	+(GT967)	+(GT1673)	+(GT1252)	+(GT1576)	Bilinmiyor
106	Juncaceae	<i>Juncus gerardi</i> Loisel. subsp. <i>gerardi</i>	Erkekkofo	+	-	+(GT1646)	+(GT1004)	+(GT1613)	+(GT1666)	Bilinmiyor
107	Lamiaceae	<i>Vitex agnus-castus</i> L.	Hayıt	+	-	+(GT1194)	+(GT1330)	+(GT1017)	+(GT1045)	Akdeniz
108	Lythraceae	<i>Lythrum tribracteatum</i> Salzm. ex Ten.	Üçaklarotu	+	-	+(GT1541)	+(GT1450)	+(GT1253)	+(GT1607)	Bilinmiyor
109	Papaveraceae	<i>Glaucium flavum</i> Crantz	Gündürmelâlesi	+	+	+(GT976)	+(GT1362)	+(GT1069)	+(GT1120)	Bilinmiyor
110	Papaveraceae	<i>Hypocoum procumbens</i> L.	Düğmecik	+	-	+(GT1075)	+(GT1104)	+(GT1237)	+(GT1635)	Bilinmiyor
111	Papaveraceae	<i>Papaver rhoeas</i> L.	Gelincik	+	-	+(GT1645)	+(GT1451)	+(GT1209)	+(GT1306)	Bilinmiyor
112	Plantaginaceae	<i>Plantago afra</i> L.	Ateşyaprağı	+	+	+(GT1577)	+(GT1187)	+(GT1204)	+(GT1054)	Bilinmiyor
113	Plantaginaceae	<i>Plantago bellardii</i> All.	Babadeşen	+	-	+(GT1343)	+(GT1452)	+(GT1540)	-	Akdeniz
114	Plantaginaceae	<i>Plantago coronopus</i> L.	Çiğnak	+	-	+(GT1218)	+(GT1038)	+(GT1189)	+(GT1010)	Akdeniz
115	Plantaginaceae	<i>Plantago lagopus</i> L.	Kırkdamarotu	+	+	+(GT1590)	+(GT1672)	+(GT968)	+(GT1638)	Akdeniz
116	Plantaginaceae	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Damarlıca	+	+	+(GT975)	+(GT1152)	+(GT1654)	+(GT1009)	Bilinmiyor
117	Plumbaginaceae	<i>Limonium angustifolium</i> (Tausch) Turritt	Sahilkaranfili	+	+	+(GT1608)	+(GT1330)	+(GT1230)	+(GT1667)	Akdeniz
118	Plumbaginaceae	<i>Limonium bellidifolium</i> (Gouan) Dumort	Hoşkuduzotu	+	-	-	-	-	-	Avrupa-Sibirya
119	Plumbaginaceae	<i>Limonium graecum</i> (Poir.) Rech.f.	Kumkaranfili	+	-	-	-	+(GT1521)	+(GT1307)	Akdeniz
120	Plumbaginaceae	<i>Limonium sinuatum</i> (L.) Mill.	Denizlavantası	+	-	+(GT1320)	+(GT1364)	-	-	Akdeniz
121	Plumbaginaceae	<i>Limonium virgatum</i> (Willd.) Fourr.	Cılızot	+	+	+(GT1337)	+(GT1227)	+(GT1254)	+(GT1008)	Akdeniz
122	Poaceae	<i>Aegilops biuncialis</i> Vis.	İkikılıç	-	+	+(GT1091)	+(GT1612)	+(GT1018)	+(GT1027)	Bilinmiyor
123	Poaceae	<i>Aeluropus littoralis</i> (Gouan) Parl.	Sahilayrığı	-	+	+(GT1095)	+(GT1363)	+(GT1361)	+(GT1114)	Bilinmiyor
124	Poaceae	<i>Arundo donax</i> L.	Kargı	-	+	+(GT1197)	+(GT1341)	+(GT1256)	+(GT1668)	Bilinmiyor
125	Poaceae	<i>Brachypodium distachyon</i> (L.) P.Beauv.	Tekkilcan	+	-	+(GT1050)	+(GT1070)	+(GT1019)	+(GT1044)	Akdeniz
126	Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers. var. <i>villosus</i> Regel	Köpekdişi	-	+	+(GT1096)	+(GT1005)	+(GT1051)	+(GT1342)	Bilinmiyor
127	Poaceae	<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P. Beauv.	Darıcan	+	+	+(GT1647)	+(GT1039)	+(GT1578)	+(GT1115)	Bilinmiyor
128	Poaceae	<i>Elymus farctus</i> (Viv.) Runemark ex Melderis	Cicora	+	-	+(GT1094)	+(GT1210)	-	-	Bilinmiyor
129	Poaceae	<i>E. flaccidifolius</i> (Boiss. & Heldr.) Melderis	Bataklıkicorası	+	+	+(GT1331)	+(GT1609)	+(GT1028)	+(GT974)	Bilinmiyor
130	Poaceae	<i>Holcus annuus</i> Salzm. ex C.A.Meyer	Gıygın	+	-	+(GT1097)	+(GT1309)	+(GT1228)	+(GT969)	Akdeniz

131	Poaceae	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steudel	Kamış	+	-	+(GT1648)	+(GT1030)	+(GT1255)	+(GT1007)	Avrupa-Sibirya
132	Poaceae	<i>Poa bulbosa</i> L.	Yumrusalkım	+	-	+(GT1092)	+(GT1670)	+(GT1332)	+(GT1636)	Bilinmiyor
133	Poaceae	<i>Stipa capensis</i> Thunb.	Kumkılacı	+	+	+(GT1040)	+(GT1162)	+(GT1124)	+(GT1172)	Akdeniz
134	Poaceae	<i>Elymus elongatus</i> (Host) Runemark	Putautu	-	-	-	-	+(GT1653)	+(GT1520)	Bilinmiyor
135	Polygonaceae	<i>Polygonum maritimum</i> L.	Sicimlik	+	+	+(GT1071)	+(GT1134)	+(GT1308)	+(GT1579)	Bilinmiyor
136	Polygonaceae	<i>Rumex pulcher</i> L. subsp. <i>pulcher</i>	Ekşilik	+	-	+(GT1611)	+(GT1226)	+(GT1652)	+(GT1053)	Bilinmiyor
137	Primulaceae	<i>Anagallis arvensis</i> L.	Farekulağı	+	-	+(GT1098)	-	-	-	Bilinmiyor
138	Primulaceae	<i>Anagallis arvensis</i> L. var. <i>arvensis</i>	Farekulağı	+	-	+(GT970)	+(GT1325)	+(GT1333)	+(GT1110)	Bilinmiyor
139	Rosaceae	<i>Sarcopoterium spinosum</i> (L.) Spach	Abdestbozan	+	+	-	-	-	-	Akdeniz
140	Rubiaceae	<i>Crucianella imbricata</i> Boiss.	Kurakaçotu	+	-	+(GT1258)	+(GT1144)	-	-	Akdeniz
141	Rubiaceae	<i>Galium aparine</i> L.	Çobansüzgeci	+	-	+(GT1649)	+(GT1072)	+(GT1310)	+(GT1043)	Bilinmiyor
142	Rubiaceae	<i>Galium brevifolium</i> Sm.	Sünnetotu	+	-	-	-	-	-	Akdeniz
143	Rubiaceae	<i>Galium caminianum</i> Schult.	Bursasünnetlicesi	-	+	-	-	-	+(GT973)	Akdeniz
144	Rubiaceae	<i>Sherardia arvensis</i> L.	Gökörenotu	+	-	+(GT1580)	+(GT1041)	+(GT1154)	+(GT1637)	Akdeniz
145	Rubiaceae	<i>Valantia hispida</i> L.	Kıllıörenotu	+	+	+(GT1217)	+(GT1182)	+(GT1029)	+(GT1479)	Akdeniz
146	Rubiaceae	<i>Valantia muralis</i> L.	Örenotu	+	-	+(GT1099)	+(GT1669)	+(GT1224)	+(GT1610)	Akdeniz
147	Santalaceae	<i>Thesium humile</i> Vahl.	Bodurgüvelek	+	+	+(GT1478)	+(GT1006)	+(GT1073)	+(GT1334)	Akdeniz
148	Selaginellaceae	<i>Selaginella denticulata</i> (L.) Link	Dişliselagin	+	-	+(GT1259)	+(GT1222)	+(GT1336)	+(GT1074)	Bilinmiyor
149	Tamaricaceae	<i>Tamarix tetrandra</i> Pall. ex Bieb.	Gezik	+	+	+(GT1093)	+(GT1207)	+(GT1651)	+(GT1105)	Bilinmiyor
150	Typhaceae	<i>Typha angustifolia</i> L.	Saz	+	-	+(GT1650)	+(GT1335)	+(GT971)	+(GT1164)	Bilinmiyor
151	Typhaceae	<i>Typha domingensis</i> Pers.	Şeytanmumu	+	+	+(GT972)	+(GT1052)	+(GT1042)	+(GT1320)	Bilinmiyor
152	Xanthorrhoeaceae	<i>Asphodelus aestivus</i> Brot.	Kırğıçkökü	-	+	+(GT1186)	+(GT1315)	+(GT1192)	+(GT1200)	Bilinmiyor

E: Endemik takson; *Daha önce çalışılan alanlar 1-3) Altınova, Sarımsaklı, Badavut, Gönen. **İlk defa çalışılan kumul alanlar: Armutova, Çoruk, Belkis Tombolesu, Karabiga

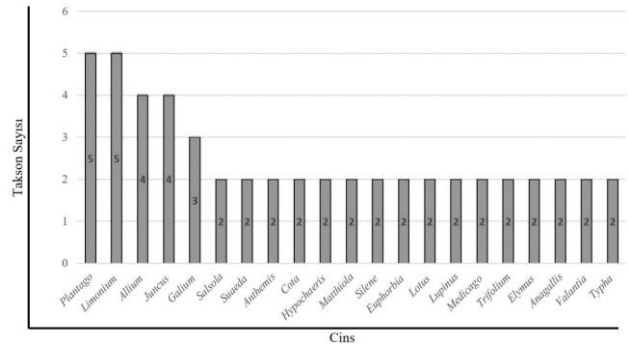
4. Tartışma ve Sonuç

Floristik çalışmalar sonucunda Balıkesir’deki 8 kıyı kumul alanında (Ayvalık, Altınova, Sarımsaklı, Badavut, Armutova, Çoruk, Belkıs Tombolosu ve Karabiga); 39 familyaya ait 120 cins ve 152 taksonun yayılış gösterdiği ortaya konmuştur. Bu kumul alanlarından; Altınova, Sarımsaklı, Badavut ve Gönen kumullarındaki bitki çeşitliliği Satıl vd (2019 a,b) tarafından tespit edilmiş olup bu çalışmamızda Balıkesir ilindeki tüm kumul alanlardaki bitki çeşitliliği toplu halde verilmiştir. Alanda sadece bir endemik taksona (*Trigonella coerulescens* subsp. *ayvalikensis*) rastlanmış olup endemizm oranı % 0.7 olarak belirlenmiştir. Alanda yapılan floristik çalışmalar sonucunda en fazla taksona sahip olan familya Asteraceae (24 takson) olup; bunu sırasıyla Fabaceae (15 takson), Poaceae (13 takson) ve Amaranthaceae (10 takson) takip etmektedir (Şekil 3). Çalışma alanımıza yakın olan Çanakkale’de önemli kumul ve tuzcul alanların florası ve ekolojisi üzerine yapılan bir çalışmada ise bizim bulgulardan farklı olarak; toplam 51 familya, 164 cins ve 257 takson tespit edilmiş, bizim bulgulara benzer şekilde ilk üç familyanın Poaceae, Asteraceae ve Fabaceae olduğu görülmüştür (Özmen ve Uysal 2012). Çalışma alanlarımızdan Burhaniye ve Ayvalık kumullarına yakın Edremit körfezi kumul florası üzerine çalışma yapan Güçlü (2019); alanda 56 familya ve 180 cinse ait toplam 238 takson tespit etmiştir. En çok cins içeren familyalar Asteraceae (25), Poaceae (19) ve Fabaceae (17) olmasıyla bizim sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Gönen, Karabiga ve Erdek kumullarına benzer iklim ve karaktere sahip Mudanya sahilinde Daşkın (2012) tarafından yapılan floristik bir çalışmada da 55 familya, 181 cinse ait toplam 252 takson tespit edilmiştir. En zengin familyalar; Asteraceae (42), Poaceae (33), Chenopodiaceae/Caryophyllaceae (12)’dir. Bu çalışma sonuçlarına göre taksonların familyalara göre sıralanması az bir farkla bizim çalışma ile benzerlik göstermektedir.



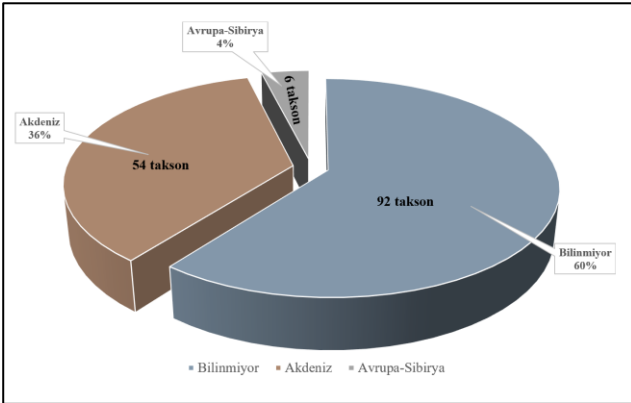
Şekil 3. Balıkesir kıyı kumullarında tespit edilen taksonların familya bazında dağılımı.

Flora of Turkey’e göre en çok cins içeren familyalar Poaceae, Asteraceae, Apiaceae, Brassicaceae, Fabaceae olarak sıralanmaktadır (Davis 1965-1985, Davis vd. 1988). Sıralama açısından küçük farklar bulunmasına rağmen bizim çalışmamızdaki familya sıralaması ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Ayrıca, Asteraceae, Fabaceae ve Poaceae familyalarının çalışma alanında en fazla tür içeren ilk üç familya olması, içerdikleri takson sayısı fazlalığı ve farklı yaşam ortamlarına uyum sağlama özellikleri ile açıklanabilir. Bunlara ek olarak, kıyı kumulları üzerinde oluşan antropojenik baskı ve zarar göz önüne alındığında bu familya üyelerinin daha yaygın görülmesi doğal karşılanmaktadır. Taksonların cins bazında dağılımları incelendiğinde; en fazla taksona sahip olan cinslerin 5’er taksonla *Plantago* ve *Limonium* olduğu, bunları 4’er taksonla *Allium* ve *Juncus* cinslerinin takip ettiği görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Balıkesir kıyı kumullarında tespit edilen taksonların cins bazında dağılımı

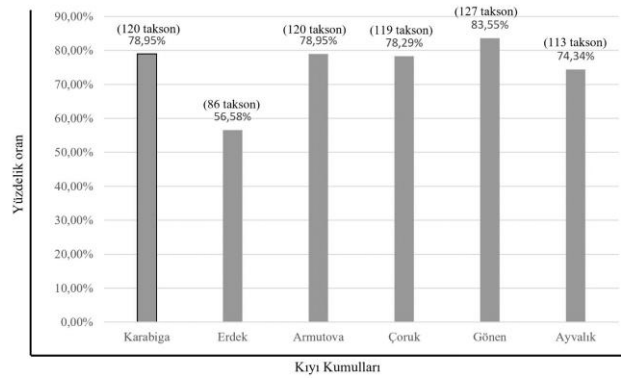
Taksonların fitocoğrafik bölgelerine dağılışı incelendiğinde; Akdeniz Elementi %35 (54 takson), Avrupa-Sibirya Elementi %4 (6 takson) ile bilinmeyenler %61 (92 takson) şeklindedir (Şekil 5). Güçlü (2019) tarafından Edremit körfezi kumul florası üzerine yapılan bir çalışmada tespit edilen taksonların fitocoğrafik bölgeye göre dağılımı; 91 Akdeniz (%37.91), 12 Avrupa-Sibirya (%5) ve 2 tür ve tür altı takson İran-Turan (%0.83) olarak belirlenmiştir. Bölgesi bilinmeyen ya da birden fazla bölgeye dahil olan takson sayısı ise 132'dir (%56)'dır. Bu veriler bizim çalışma verileri ile benzerlik göstermektedir. Gönen, Karabiga ve Belkıs Tombolosu kumullarına benzer iklim ve karaktere sahip Mudanya kıyı florasında da taksonların fitocoğrafik bölgelere göre dağılımı; 55(%22)'i Akdeniz, 17(%6.8)'si Avrupa-Sibirya, 3 (%1.2)'ü İran-Turan ve 175(%70)'i de çok bölgeli ya da bölgesi bilinmeyenler şeklindedir (Daşkın 2012). Sonuç olarak Mudanya florasının sonuçları da bizim sonuçlara paralellik göstermektedir.



Şekil 5. Balıkesir kıyı kumullarında tespit edilen taksonların fitocoğrafik elementlere göre dağılımı

Bu çalışmada ayrıca Balıkesir'deki 8 kumul alanın florası kendi içinde karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Buna göre; Gönen ilçesindeki kumul florasının 127 taksonla (%83.55) en zengin kumul alanı olduğu görülmektedir. Gönen kumullarını 120 taksonla (%78.95) Karabiga kumulu takip etmektedir (Şekil 6). Takson sayısının diğer kumullara nazaran Gönen ve Karabiga da yüksek olması, söz konusu bu alanların coğrafik konumu ve iklim çeşitliliğine bağlı olarak hem Akdeniz hem de Öksin elementlerin birlikte bulunması ile açıklanabilir. Ayrıca, Çizelge 2'de, araştırma sonuçlarımız ile araştırma alanımıza yakın

olan bölgelerde yapılan floristik çalışmalar karşılaştırılmıştır. Çizelge 2'de de görüleceği gibi çalışma alanlarımızdan yakın bölgede yapılan tüm çalışmalarda en çok takson sayısına sahip familya sıralaması ve fitocoğrafik elementler açısından benzerlik görülmektedir. Edremit ve Ayvalık körfez bölgelerindeki kumullarının takson sayıları birbirine yakın görülmektedir. Çalışılan kumullar arasında en az takson sayısına Belkıs Tombolosu (Erdek)'nda rastlanmıştır. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir; Belkıs Tombolosu, alüvyal düzlük, kum ve çakıllardan meydana gelmiştir. Bu tombolosun doğusunda kumullar, batısında plaj kumları, kuzey ve güneyinde alüvyal alanlar, ortasında ise bir bataklık yer almaktadır. Yaklaşık 1 km uzunluğundaki bu bataklık alan genellikle kuzeyden gelen iki akarsuyun taşıdığı malzeme ile sürekli olarak daralmaktadır (Cürebal vd. 1998). Aktif kumul sahasının kuzeybatı kenarında kalan kumullar üzerinde DSİ tarafından yerleştirilen sazlıklarla; bu sahadaki kumul hareketi önlenmeye çalışılmıştır (Hapçoğlu, 1977).



Şekil 6. Balıkesir kıyı kumullarında tespit edilen toplam takson sayısının kumul alanlarına göre yüzdelik dağılımları

Çizelge 2. Çalışma alanları ile yakın çevredeki benzer çalışmaların karşılaştırılması

	Çalışma Alanı	Familya	Cins	Tür	Baskın Fitocoğrafik Dağılım	Baskın İlk Üç Familya
YAKIN ÇEVREDE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	Edremit Körfezi Güçlü (2019)	56	180	238	%37.91 Akdeniz Elementi	Asteraceae (32 takson) Fabaceae (28 takson) Poaceae (23 takson)
	Çanakkale Özmen ve Uysal (2012)	51	164	257	%35 Akdeniz Elementi	Poaceae (43 takson) Asteraceae (33 takson) Fabaceae (29 takson)
	Armutlu Yarımadası İnan (1994)	52		212	-	Lamiaceae (20 takson) Asteraceae (20 takson) Fabaceae (19 takson)
	Mudanya Daşkın (2012)	55	181	252	%22 Akdeniz Elementi	Asteraceae (42 takson) Poaceae (33 takson) Chenopodiaceae (12 takson)
	Armutlu Yarımadası Kaynak (1997)	37	153	312	%9.5 Akdeniz Elementi	Asteraceae (123 takson) Fabaceae (91 takson) Brassicaceae (41 takson)
	Ayvalık Satıl vd. (2019)	33	91	118	%36 Akdeniz Elementi	Asteraceae (16 takson) Fabaceae (15 takson) Poaceae (8 takson)
	Gönen Satıl vd. (2019)	32	75	86	%20 Akdeniz Elementi	Asteraceae (17 takson) Poaceae (7 takson) Brassicaceae (7 takson)
ÇALIŞMA ALANLARI	Karabiga (Gönen)	33	93	150	%35 Akdeniz Elementi	Asteraceae (19 takson) Poaceae (12 takson) Brassicaceae (7 takson)
	Belkıs Tombolosu (Erdek)	18	33	42	%33 Akdeniz Elementi	Asteraceae (10 takson) Amaryllidaceae (4 takson) Poaceae (3 takson)
	Çoruk (Burhaniye)	32	93	117	%32 Akdeniz Elementi	Asteraceae (14 takson) Fabaceae (14 takson) Poaceae (12 takson)
	Armutova (Gömeç)	32	92	117	%32 Akdeniz Elementi	Fabaceae (14 takson) Asteraceae (13 takson) Poaceae (12 takson)

Balıkesir'deki kumul alanları tehdit eden faktörler:

Çalışma alanımızdaki kıyı kumul alanlarının hepsi turizm sahası içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle tüm kumul alan habitatları, ikinci konut inşaatı ve plaj düzenlemeleri gibi faaliyetler nedeniyle yoğun baskı altındadır. Avcı (2017c), Türkiye'de kumul alanların, en fazla yerleşmeler tarafından tehdit edildiğini ifade etmektedir. Çalışılan tüm kumul alanlarda ortak sorun olan ikinci konutların önce Marmara denizinin kuzey kıyılarından başlayarak güneye doğru yayılmasıyla Erdek, Edremit, Burhaniye ve Ayvalık gibi yerlerde turizm alanları gelişmiş. Nüfusun kumullar üzerindeki olumsuz etkisi zaman içinde artarak devam etmiştir. Sarımsaklı kumullarında lokal endemik *T. coerulescens* subsp. *ayvalikensis* plajlar bölgesinde yayılış göstermesi nedeniyle doğal habitatları turizm baskısı altındadır (Şekil 7a). Ayrıca, bölgedeki kumul alanlarda *Pancretium maritimum* soğanlarının halk tarafından toplanıyor olması ve yayılış alanında plaj düzenlemeleri nedeniyle habitat bozulmaları bu türün popülasyonlarını oldukça düşürmüştür. Bu amaçla, *P. maritimum* popülasyonları üzerinde Milli Parklar Şube Müdürlüğü ve yerel yönetim işbirliği ile koruma çalışmaları başlatılmışlardır. Ancak bu çalışmalar yeterli düzeyde değildir (Şekil 7b,c). Hem *T. coerulescens* subsp. *ayvalikensis* hem de *P. maritimum* taksonları ile ilgili tür eylem planlarına ihtiyaç vardır.

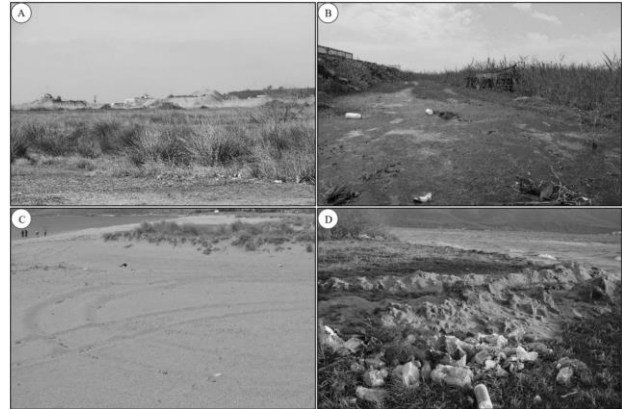


Şekil 7. Ayvalık kıyı kumullarında; A) *T. coerulescens* subsp. *ayvalikensis* habitati, B-C) *P. maritimum* türünü koruma çalışmaları ve alınan önlemler.

Karabiga Beldesi çevresinde yapılan termik santrallerin oluşturduğu habitat tahribatı, kıyı ve karasal ekosistem üzerinde kirliliği neden olmaktadır. Erduran Nemitlu ve Doğan (2020), Karabiga deltası civarında, sanayi ve turizm alanlarının bölge değerleri dikkate alınmaksızın planlamalar yapıldığı ifade etmektedir. Çalışmada yaptığımız gözlemlerde söz konusu alanda yanlış yer

seçimi sonucu kumul alan florası ve biyolojik çeşitliliği zarar gördüğü tespit edilmiştir (Şekil 8a). Kırış ve Veyer (2016), Karabiga ve çevresi ile ilgili hazırladıkları bir raporda Karabiga kıyıları, Kocabaş Çayı ve Kocabaş Deltası'nın uluslararası ölçütlere göre değerlendirildiğinde Önemli Doğa Alanı (ÖDA) olacak kalitede bir alan olduklarını belirtmektedir. Ancak, söz konusu kıyı şeridi son zamanlarda çok ciddi bir habitat tahribatı tehdidi altındadır. Bu bölgedeki kumul alanların korunabilmesi için, kıyı bölgesini tahrip eden sanayi alanları, ekolojik faktörler gözetilerek yapılacak yeni planlamalar ile farklı bölgelere taşınmalıdır.

Bölgedeki kumul alanları tehdit eden diğer sorunlar; kirlilik, çöp atma, denizden kum alımı ve plaj düzenlemeleri sonucu kumul alan tahribatıdır. Erdek, Edremit, Burhaniye ve Ayvalık gibi yerlerde plaj düzenlemeleri, Gönen, Belkıs Tombolosu ve Karabiga'da kirlilik ile birlikte kıyıya çöp atılması ve tarımsal faaliyetler kumul alanları ve florayı tehdit eden faktörlerdir (Şekil 8).



Şekil 8. Çalışılan kıyı kumullarında görülen çevresel sorunlar (A: Karabiga, kum alımı; B: Gönen, kirlilik; C: Çoruk/Armutova, plaj düzenlemesi; D: Belkıs Tombolosu, çöp yığınları)

5. Kaynaklar

- Akyol, Y. ve Gemici, Y., 2017. Kıyı Ege'nin (Gökova ve Edremit Körfezleri Arası) Vegetasyon Ekolojisi ve Biyolojik Çeşitliliğinin Ekolojik Yönetimi. *Kastamonu Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi*, **17** (1), 116-123.
- Avcı, M., Avcı, S. ve Akkurt, S. 2015. Coastal dune vegetation in Turkey: a geographical perspective. International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST 2015, Varna, Bulgaristan, 6-10 Ekim 2015, vol.1: 397-405.
- Avcı, M., 2017a, Türkiye'nin Kıyı Kumullarında Bitki Örtüsü, Yasal ve Bilimsel Boyutlarıyla: Kıyı (Ed. H. Turoğlu ve H. Yiğitbaşıoğlu), Jeomorfoloji Derneği Yayını No: 1, Anka matbaa, İstanbul: 63-92.
- Avcı, M., 2017b. Türkiye'nin Kıyı Kumulları, Bitki Örtüsü ve Önemi. International Symposium on Geomorphology, 12-14 October 2017, Elazığ/Türkiye.
- Avcı, S., 2017c, Kıyı Alanların Kullanımında Beşeri Faktörler. Yasal Bilimsel Boyutlarıyla Kıyı, Turoğlu, H., Yiğitbaşıoğlu (Editörler), Jeomorfoloji Derneği, İstanbul, 117-146.
- Bekat, L., 1980. Karaburun-Akdağ çevresinin flora ve vegetasyonu, Yüksek Lisans tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 34.
- Bekat, L. and Seçmen, Ö., 1988. Vegetation In der umgebung von Foça, Aliağa und Çandarlı. *Journal of Faculty of Science Ege University Series B*, **10** (2), 15-27.
- Brummit, R.K. and Powel, C.E., 1992, Authors of Plant Names, Royal Botanic Gardens, Kew, 732.
- Cürebal, İ., Kızılçaoğlu, A. ve Soykan, A., 1998. Belkıs Tombolosunun Jeomorfolojik ve Uygulamalı Jeomorfolojik Özellikleri. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **1**(1), 1-23.
- Daşkın, R. 2012. Vascular Plants of Mudanya Cost (Bursa, South Marmara/Turkey). *Biological Diversity and Conservation*, **5**(3), 28-36.
- Davis, P., 1965-1985, Flora of Turkey and East Aegean Islands, Vol. 1-9, Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Davis, P., Mill, R.R. and Tan, K., 1988, Flora of Turkey and East Aegean Islands (Supplements I), Vol. 10, Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Demiriz, H., 1969. Armutlu (Gemlik) Çevresinin Florası Hakkında (Zur Flora von Armutlu bei Gemlik). *Acta Biologica Turcica*, **19** (2-4), 107-109.
- Ekim T., Koyuncu M., Vural M., Duman H., Aytaç Z. ve Adigüzel N., 2000, Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabı. Eğrelti ve Tohumlu Bitkiler. Ankara: Barışcan Ofset, 1-96.
- Erduran Nemutlu, F. ve Doğan, Z., 2020. Karabiga (Çanakkale) Beldesi Mevcut Alan Kullanımlarının Belirlenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, **8** (1), 107-113.
- Eriñç, S., 2001, Jeomorfoloji II (3.Basım), Der Yayınları No: 294, İstanbul.
- Güçlü, H., 2019. Edremit körfezi (Balıkesir-Çanakkale) kumul florası, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Ana Bilim Dalı, Ankara, 100.
- Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M., ve Babaç, M.T. (edlr.), 2012, Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler). Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayınları, İstanbul.
- Güner, A., Özhatay, N., Ekim, T., and Başer, K.H.C., 2000, Flora of Turkey and East Aegean Islands (Supplements II), Vol. 11, Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Hapçioğlu, N., 1977. Kapıdağ Kıyılarında Jeomorfolojik Gözlemler. *İÜ Coğrafya Enstitü Dergisi*,: **22**, 203-210.
- IUCN, 2019. The IUCN Red List of Threatened Species. Version. 20192. <http://www.iucnredlist.org>. Downloaded on 18 July 2019.
- İnan, M., 1994. Armutlu yarımadasının florası. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 54.
- Kaynak, G., 1997. Flora of Armutlu Peninsula III, *Lagascalia* **20**(1), 63-98.
- Kıraç, C.O ve Veryeri, N.O., 2016, Güneybatı Marmara Denizi ve Karabiga Kıyılarında (Biga, Çanakkale)

Biyolojik Çeşitlilik ve Deniz-Kıyı Habitatları Araştırma
Sonuç Raporu. SAD Yayını. Ankara. 42.

Odum, E.P. ve Barrett, G.W., 2008, Ekolojinin Temel
İlkeleri (Editör K. Işık). Ankara, Palme Yayıncılık.

Özhatay, N. ve Byfield, A., 1996, Türkiye'nin Kuzey
Kumullarının Korunmasına Yönelik Rapor, Doğal
Hayatı Koruma Derneği, İstanbul.

Özmen H.ve Uysal, İ. 2012. Çanakkale'de (Türkiye) Önemli
Kumul ve Tuzcul Alanların Florası ve Ekolojisi, 21.
Ulusal Biyoloji Kongresi, 03-07 Eylül 2012, Ege
Üniversitesi, İzmir, 669-670.

Roskov, Y., Ower, G., Orrell, T., Nicolson, D., Bailly, N.,
Kirk, P.M., Bourgoin, T., DeWalt, R.E., Decock, W.,
Nieukerken, E. van, Zarucchi J., Penev, L., eds. 2019,
Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2019 Annual
Checklist. Digital resource at
www.catalogueoflife.org/annualchecklist/2019.Species
es 2000: Naturalis, Leiden, the Netherlands. ISSN
2405-884X.

Satıl, F., Tümen, G. ve Selvi, S., 2019a. Ayvalık
(Balıkesir/Turkey) Dune Plant Diversity, Threatening
Factors and Solution Proposals. *Journal of the
Institute of Science and Technology*, **9**(3), 1289-1298.

Satıl, F., Tümen, G. ve Selvi, S. 2019b. Gönen deltası
kumul bitki çeşitliliği, tehdit faktörleri ve çözüm
önerileri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi
Dergisi*, **20**(2), 208-217.

Strid, A. ve Tan, K. (eds.) 1991, Mountain flora of Greece.
Vol. 2., Edinburgh University Press. Edinburgh, UK.

Tutin, T.G., Heywood, V.H., Burges, N.A., Valentine, D.H.,
Walters, S.M. and Webb, D.A., 1964-1980, Flora
Europae, Vol: 1-5, Cambridge at Univ. Press,
Cambridge.

Uslu, T., 1988. Türkiye Kıyı Kumulları. IX. Ulusal Biyoloji
Kongresi, 21-23 Eylül 1988, Sivas. 175- 183.

Araştırma Makalesi / Research Article

Ballakayati'nin (Erbil - Kuzey Irak) Yabani Gıda Bitkileri Hakkında Geleneksel BilgilerAwara Mohammed A.M.A. KAWARTY¹, Lütfi BEHÇET², Uğur ÇAKILCIOĞLU^{3*}^{1,2} Bingöl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Bingöl.³ Munzur Üniversitesi, Pertek Sakine Genç MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Tunceli.e-posta: a.kawarty79@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6330-1340>e-posta: lbehcet2000@yahoo.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8334-7816>Sorumlu yazar e-posta e-posta: ucakilcioglu@yahoo.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3627-3604>

Geliş Tarihi: 03.03.2021

Kabul Tarihi: 10.05.2021

Öz

Bu çalışma, Ballakayati (Kuzey Irak - Erbil) ilçesinde yöre halkı tarafından gıda amaçlı kullanılan yabancı bitkileri tespit etmeyi ve bu bitkilerin yerel adlarını ve kullanımlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma 2016-2018 yılları arasında yaklaşık üç yıl boyunca gerçekleştirildi. Bu süre zarfında 62 bitki taksonu örneği toplandı. Bu çalışmada kullanılan bitkilerin literatür incelemesinde 59 taksonunun gıda amaçlı kullanıldığı tespit edilirken, literatür kayıtlarında üç bitkiye rastlanmamıştır. Yerel bitki isimleri, Kuzey Irak'taki yerel lehçelere göre farklılık gösterir. Yerel halk, ilçelerinde yetişen yabancı bitkilerden yararlanmaktadır. Bu alanda yöre halkının 23 familyaya ait 62 taksonun gıda amaçlı kullandığı tespit edildi. En önemli gıda bitkileri *Juglans regia* L., *Allium ampeloprasum* L., *Prunus dulcis* (Mill.) D.A.Webb. Ayrıca gıda amaçlı kullanılan bitkiler kurutulup kış aylarında kullanılmak üzere depolanmaktadır. Bu alanda tespit ettiğimiz *Carduus pycnocephalus* L., *Smyrniium cordifolium* Boiss., *Epilobium hirsutum* L. gıda kullanımı ilk kez kayıt altına alındı. Bu çalışmada bu bitkilerin farklı kullanım şekilleri gözlemlenmiştir. Irak'ta etnobotanik çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. Ancak, birçok yabancı gıda bitkisinin geleneksel kullanımları henüz kaydedilmemiştir. Gıda güvenliği açısından yabancı bitki taksonlarının yeterli bilgi olmadan kullanılmasından kaynaklanabilecek olumsuz etkilerin yerel halka bildirilmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler

Geleneksel kullanım;
Yabancı gıda bitkileri;
Etnobotanik; Kuzey
Irak; Ballakayati

Traditional Knowledge on Wild Food Plants in Ballakayati (Erbil - North Iraq)**Abstract**

This study purposes to identify wild plants used for food purposes by native people of Ballakayati district of (Erbil-North Iraq), and to determine the vernacular names and the uses of those plants. The study was carried out approximately for 3 years between 2016-2018. During this period of time, 62 taxa were collected. In the literature review of the plants used in this study, 59 taxa were found to be used for food purposes while three plants were not found in the literature records. Vernacular names differ due to the local dialects in Iraq. Local peoples benefit from the wild plants growing in their districts. In this area, it was found that locals use 62 plants from 23 families for food purposes. The most considerable food plants were *Juglans regia* L., *Allium ampeloprasum* L., *Prunus dulcis* (Mill.) D.A.Webb. Moreover, plants used for food purposes are dried and stored for using them in winter. The food use of *Carduus pycnocephalus* L., *Smyrniium cordifolium* Boiss., *Epilobium hirsutum* L. that we found in this area were recorded for the first time. Different using forms of those plants were observed in this study. In Iraq, the number of ethnobotanical studies is ever increasing. But traditional uses of many wild food plants have not been recorded yet. In terms of food security, the adverse effects that may arise due to the use of wild plant taxa with-out sufficient knowledge must be reported to the local people.

Keywords

Traditional use; Wild
food plants;
Ethnobotany; North
Iraq; Ballakayati

1. Giriş

Etnobotanik, eski çağlardan günümüze değin insan ve bitki ilişkileri olarak tanımlanabilen ve kökeni botaniğe dayanan disiplinler arası bir bilim dalıdır (Harshberger 1896, Muthu vd. 2006). "Etnobotanik" kelimesini tarihte ilk kez 1896' da Amerikalı botanikçi John Harshberger tarafından yerli halkın kullandığı bitkilerin incelenmesi olarak tarif edilmiştir. O zamandan beri, yerli insan toplulukları çevrelerindeki bitki çeşitliliğe aşinadır ve belirli bir kültüre sahiptir.

Yabani gıda bitkileri tıbbi amaçlı olarak da kullanılabilir (Civelek ve Türkoğlu 2000, Akgül vd. 2016). Bitkiler yemek olarak kullanıldığında taze ya da pişirilir, ardından yoğurt ilave edilir, yumurta ve pirinç eklenir veya salata şeklinde yenilir. Gıda amaçlı kullanılan bitkiler alternatif olarak çorba şeklinde tüketilir (Polat vd. 2017; Yerebasan vd. 2020).

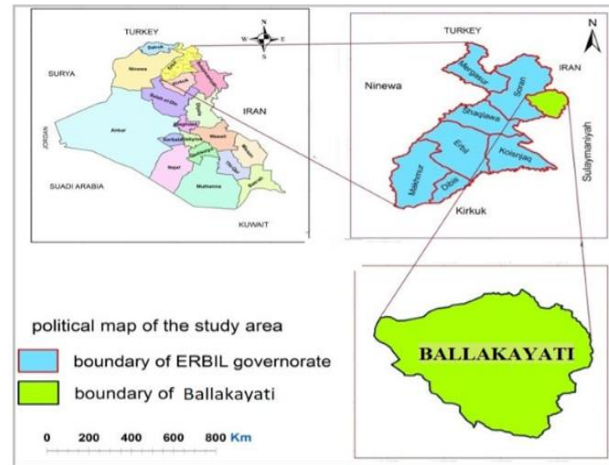
Günümüzde, Kuzey Irak'taki kasaba, köy ve kırsal alanlarda geleneksel bitki kullanımı yaygındır. Mati ve de Boer (2010) tarafından Erbil'deki göçebe kabileler arasında doğal boya kullanımı üzerine yapılan bir araştırmanın yanı sıra, Irak'ta yapılan etnobotanik araştırmalar oldukça sınırlıdır (Mati ve de Boer 2011). Kuzey Irak endemik türler açısından son derece zengin bir bölgedir (Guest ve Al-Rawi 1966). Kuzey Irak florasına ait bitkilerin bazılarını, komşu ülke olan Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yürütülen bitki çalışmalarında görmek mümkündür (Yüce Babacan vd. 2017, Erecevit ve Kırbag 2017, Selvi vd. 2019, Çakılıoğlu 2020, Erecevit-Sönmez vd. 2020, Satıl ve Selvi 2020).

Ballakayati'de daha önce floristik çalışmalar yapılmamıştır. Ancak yakın bölgelerde yapılmış bazı çalışmalar vardır (Mati ve de Boer 2010, Saman ve Ali 2015, Kawarty vd. 2020). Bu çalışma ile Ballakayati Bölgesinde yaşayan yöre halkının gıda amaçlı tükettikleri doğal bitkiler belirlenmiştir. Bölgede yetişen bitkilerin kullanım şekilleri ve yerel isimleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu araştırma ile henüz çalışılmamış bir bölgedeki doğal gıda bitki çeşitliliğini ortaya koyarak, bitki kaynaklarımızı değerinin anlaşılmasına ve bu alanların korunmasına katkı sağlayacağını ümit ediyoruz

2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışma alanı

İnceleme alanı Ballakayati, İran-Turan Fitocoğrafik Bölgesi'nin yukarı Zagros Bölümü'nde ve Erbil'in kuzeybatı sınırında, Halgord ve Sakran dağları arasında yer almaktadır (Şekil 1). Ballakayati (Erbil), 35° 30' ve 37° 15' kuzey enlemleri ile 43° 22' ve 45° 05' boylamları arasındadır. Erbil Hawler özerk bölgenin başkentidir ve 9 ilçesi vardır (Merkez Erbil, Dashty Choman, Hawler, Makhmur, Koya, Merqasur, Shaqlawa, Rawanduz ve Soran). Erbil'in toplam yüzölçümü 15.074 km² ve toplam nüfusu 1.530.722' dir. Kuzey Irak özerk bölgesi, kuzeyde Türkiye, doğuda İran ve batıda Suriye ile sınırlanmıştır. Erbil, Süleymaniye, Dahuk ve Halepçe vilayetleri ile orta Irak'ın tartışmalı bölgesi olan Kerkük vilayetinden oluşur. Bu topraklar, Zagros Dağları'na katılan ve Dicle, Great Zab ve Küçük Zab nehirlerinin geçtiği verimli ovalardır (Boesch 1939).



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu.

Ballakayati vejetasyonunda *Anthemis* L., *Acantholimon* Boiss., *Astragalus* L., *Salvia* L., *Cousinia* Cass., ve *Onobrychis* Mill. cinslerinde yer alan çok sayıda takson vardır; Ayrıca, *Artemisia herba-alba*, *Aegilops kotschy*, *Eremopyrum bonaepartis*, *Haloxylon salicornicum*, *Ephedra foliata* *Neotorularia torulosa*. gibi bazı türler Ballakayati'de yoğun olarak bulunmaktadır.

2.2 Bitki materyali

Çalışma 2016-2018 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Yörede doğal olarak yetişen yerli halkın kullandığı bitkiler materyalimizi

oluşturmaktadır. Bu süre zarfında arazi çalışmaları sonucunda kullanımı olan 62 bitki tespit edildi. Bitkilerin bilimsel adlandırılmasında Irak ve komşu ülke flora kitaplarından faydalanılmıştır. (Davis 1965-1985, Townsend ve Guest, 1966-1985, Zohary 1966-1986, Rechinger 1965-1977, Davis vd. 1988).

Çalışmada toplanan bitkiler makale yazarları tarafından incelenmiş ve tanımlanmıştır. Bu bitkiler herbaryum malzemesi haline getirilerek Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Herbaryumunda (BIN) saklanmıştır. Bitkiler familya bazında alfabetik sıraya göre listelenmiştir.

2.3 Yerel halkla görüşmeler

Bu çalışmada yöre insanıyla yüz yüze anket yapılmıştır (Ek 1). Anket kamuya açık alanlarda (Evler, bahçeler, okullar vb.) ve yoğun saatlerde yapılmıştır (Şekil 2). Görüşmeler sırasında, katılımcıların demografik bilgileri ve bitkilerin yerel isimleri, nasıl kullanıldığı ve nasıl hazırlandıkları kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2. Yerel halk ile görüşmeler.

Araştırmaya katılan kişiler Kürt etnik soyundan geldiklerini ifade etmişlerdir. Ballakayati ilçesinde ve çevresindeki köylerde yaşayanlar Kürtçe konuşmaktadır. Ayrıca bazı kişiler Arapça ve Farsça gibi komşu ülke dillerini de konuşabildikleri görülmüştür.

Ballakayati'de Gardeen erkek okulu, Darband karma eğitim hazırlık Okulu, Ashibraguiz karma eğitim hazırlık okulu, Rashdur karma eğitim hazırlık okulu, Galala karma eğitim hazırlık okulu, Federal kız lisesi, Ballak kız lisesi ve Qasre erkek lisesine anket uygulanmıştır.

Bitkilerle ilgili bilgiler bölgenin yerlisi olan halk ve öğrencilerden yüz yüze anket tekniği ile elde edilmiştir. Dağıtılan anket formlarındaki sorulara

öğrenciler, ebeveynleri ve yakınları tarafından verilen cevapların analizi sonucunda çizelge oluşturulmuştur (Çizelge 1).

2.4 Bilgi veren kişilerin demografik özellikleri

Bu araştırma sırasında, Ballakayati'nin 20 köyünde yaşayan 120 kişiyle görüşülmüş ve onlardan etnobotanik bilgiler alınmıştır. Bu kişilerin cinsiyeti, eğitim durumu, mesleki dağılımı çizelgede verilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Katılımcıların demografik özellikleri.

Cinsiyet	Sayı	%	Eğitim durumu		
			Sayı	%	
Kadın	36	30	Okuryazar	44	36.7
Erkek	84	70	İlkokul ve Ortaokul	38	31.7
Meslek	Sayı	%	Lise	29	24.1
İşçi	36	31	Üniversite	9	7.5
Çiftçi	22	18	Yaş	Sayı	%
Öğretmen	10	8	30 yaş altı	10	8.3
Emekli	1	1	30 ve 49	45	37.5
Ev hanımı	29	24	50 ve üstü	65	54.2
Diğer	22	18			

2.5 Hesaplamalar

Yerel ve bilinen türlerin göreceli önemini gösteren nicel bir yöntem olan kullanım değeri (UV) alttaki formüle göre hesaplanmıştır: $UV = U / N$ burada U; atıf sayısı ve N bilgi alınan kişi sayısıdır (Trotter and Logan 1986). Bir bitki taksonun kullanım değerinin bilinmesi, o bitkinin kullanım güvenilirliğinin anlaşılması için belirleyici olabilir (Mükemre vd. 2016).

3. Bulgular ve Tartışma

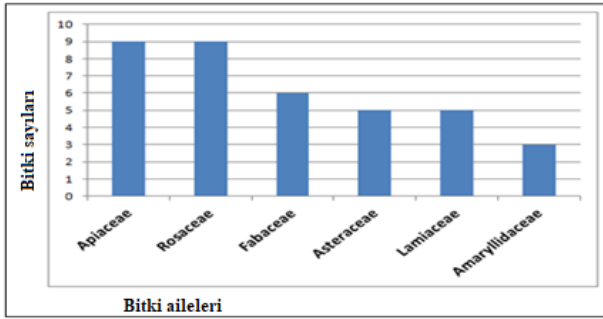
3.1 Yabani bitkilerin gıda olarak kullanılması

Ballakayati'de yapılan çalışmada yabani bitkilerin geleneksel olarak gıda amaçlı kullanımları kaydedilmiş olup, bitkilerin familya ve bilimsel adları, toplayıcı numaraları, yerel adları, yenilebilir kısımları ve kullanım şekilleri ile ilgili bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir. Toprak üstü kısımlar, soğan, çiçek, meyve, yaprak, kök, tohum ve gövde gibi bitki kısımlarının besin olarak kullanıldığı görülmüştür.

Yöre halkı tarafından yabancı bitkiler genel olarak, pişirilerek, bazı işlemlere tabi tutularak ya da taze olarak tüketilmektedir. Bitkiler ayrıca; turşu, dolma, çorba, salata, reçel ve meyve suyu yapımında, bunlara ilaveten ayrıca yemeklere ve peynire tat vermek içinde kullanılmaktadır.

Çalışmamızda gıda amaçlı olarak kullanıldığını tespit ettiğimiz bitkilerin literatür analizi sonunda üç bitkinin gıda amaçlı kullanıldığına dair bilgi bulunamamıştır. *Carduus pycnocephalus* L., *Smyrniun cordifolium* Boiss. ve *Epilobium hirsutum* L. 'un gıda olarak kullanımları bu çalışma ile ilk kez kayıt altına alınmıştır.

Ballakayati ve köylerinde yaşayan insanlarla yapılan görüşmeler sonunda gıda amaçlı olarak kullanılan en yaygın familyalar; Apiaceae, Rosaceae, Fabaceae, Asteraceae, Lamiaceae olarak belirlenmiştir. Takson saısına göre en çok kullanılan familyalar Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. En fazla taksona sahip familyalar.

3.2 Vitaminler ve mineraller

Dünyamızda şu ana kadar yaklaşık 10.000 bitki türünün gıda olarak kullanıldığı tespit edilmiş olup, besin elde etmek için yetiştirilen bitki sayısı 3.000 civarındadır. Bitkiler insanlar için zengin mineraller, vitaminler ve lif içeren doğal kaynaklardır (Tukan 1998, Baytop 1999).

Pek çok yenilebilir yabancı bitkinin hastalıkların tedavisinde kullanımının yanı sıra ayrıca vitamin ve mineral kaynağı olarak kullanılır. Bölgedeki bu tür kullanılan türler şunlardır; *Crataegus meyeri* Pojark., *Cydonia oblonga* Mill., *Glycyrrhiza glabra* L., *Juglans regia* L., *Prunus microcarpa* C.A. Mey, *P. arabica* (Olivier) Meikle, *P. dulcis* (Mill.) D.A.Webb, *Rheum ribes* L., *Rosa x dumalis* Bechst., *R. gallica* L.,

R. heckeliana Tratt. subsp. *orientalis* (A. Dupont ex Ser.) Meikle, *Rubus sanctus* Schreb.

3.2 Baharat olarak kullanım

Bitkiler koku ve tat verdikleri için baharat olarak kullanılmaktadır (Baytop1999). Bu tip kullanım dünyanın her köşesinde oldukça yaygın bir kullanımdır. *Allium ampeloprasum*, *A. fedtschenkoii*, *Anethum graveolens*, *Apium graveolens*, *Mentha longifolia*, *Ocimum basilicum*, *Origanum vulgare*, *Pimpinella anthriscoides*, *Pistacia eurycarpa*, *P. khinjuk*, *Rhus coriaria*, *Thymus kotschyianus* Ballakayati ve köylerinde baharat olarak kullanılır (Tablo 2).

3.3 Çay ve taze yenen bitkiler

Yabancı bitkilerin çay olarak tüketilmesi oldukça yaygın bir kullanımdır (Polat vd. 2015, Korkmaz vd. 2016, Güneş vd. 2018, Nadiroğlu ve Behçet 2018). *Mentha longifolia* (L.) L., *Ocimum basilicum* L., *Origanum vulgare* L., *Phlomis lanceolata*, *Rosa gallica* L., *Thymus kotschyianus* Ballakayati'de bitki çayı olarak tüketilmektedir. Ayrıca *Juglans regia* L., *O. basilicum* L., *Punica granatum* L., *Rheum ribes* L., *Quercus brantii* Lindl., *Q. infectoria* Oliv., *Trifolium purpureum* Loisel. var. *purpureum*, *Vicia narbonensis* L. ve *Ziziphus jujuba* Mill. gibi yabancı bitkiler genellikle taze olarak tüketilir.

3.4 Tıbbi bitkiler

Ballakayati'de gıda amacıyla kullanılan yabancı bitkilerin çoğu, hem Ballakayati' de hem de diğer bölgelerde tıbbi amaçlar için kullanılmaktadır (Bulut ve Tuzlacı 2013, Polat vd. 2013, Bulut vd. 2016, Demirel ve Çakılcıoğlu 2017, Karaköse vd. 2019, Kawarty vd. 2020, Satıl ve Açar 2020).

3.5 Taksonomik analiz

Çizelge 1'de Ballakayati'de gıda amaçlı geleneksel olarak kullanılan bitkilerin familya adı, bitkilerin bilimsel adı, toplayıcı numarası bitkilerin yerel adları, kullanılan kısımları, kullanım şekli ve gıda kullanım değeri (UV) yer almaktadır.

Ballakayati ilçesinde ve köylerinde yaşayan yöre halkı ile yapılan görüşmeler sonucunda çalışma alanında 62 taksonun gıda amaçlı kullanıldığı tespit edilmiştir. En yaygın olarak kullanılan familyalar; Apiaceae (9 takson), Rosaceae (9 takson), Fabaceae (6 takson), Asteraceae (5 takson), Lamiaceae (5 takson), Amaryllidaceae (3 takson), Anacardiaceae (3 takson) ve Brassicaceae (3 takson) olduğu görülmüştür (Şekil 3). Araştırma alanımıza sınır komşusu olan Geçitli (Hakkari)'de (Kaval vd. 2015) yabani gıda bitkileri üzerine yapılmış olan bir çalışmada Amaryllidaceae (6 takson), Apiaceae (18 takson), Asteraceae (9 takson), Rosaceae (8 takson), Lamiaceae (6 takson), Fabaceae (4 takson) ve Polygonaceae (4 takson) ailelerine ait bitkilerin kullanıldığı ve Çatak'ta (Mükemere vd. 2015) yapılan bir çalışmada ise, Asteraceae (19 takson), Lamiaceae (10 takson), Rosaceae (9 takson), Apiaceae ve Fabaceae (6 takson) yöre insanı tarafından kullanıldığı kayıt altına alınmıştır.

Bu çalışmada kayıt altına aldığımız 62 taksonun literatür incelemesinde 59'unun bitkinin gıda amaçlı kullanıldığı, 3 taksonun ise gıda amaçlı kullanımına rastlanmamıştır. Çalışma alanımızda kullanıldığı tespit edilen *Carduus pycnocephalus* L., *Smyrniium cordifolium* Boiss. ve *Eryngium bourgatii* Gouan'ın gıda kullanımı ilk kez bu çalışma ile ortaya konmuştur.

3.6. Veri analizi

Trotter ve Logan (1986), tarafından belirlenmiş olan kullanım değerine (UV) bağlı olarak yapılan hesaplama göre; *Juglans regia* L. (UV: 0.39), *Allium ampeloprasum* L. (0.38), *Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb. (0.37), *Rubus sanctus* Schreb. (0.37), *Thymus kotschyanus* Boiss. & Hohen (0.36), *Rheum ribes* L. (0.34), *Cydonia oblonga* Mill. (0.33), *Portulaca oleracea* L. (0.31), *Crataegus meyeri* Pojark (0.28), *Rumex tuberosus* L. (0.28), *Gundelia tournefortii* (0.25), *Rhus coriaria* L. (0.24) en yüksek kullanım değerleri olarak bulunmuştur (Çizelge 1). Gıda araştırmalarında kullandığımız UV, alternatif gıda bitkileri araştırmacıları, gıda güvenliği çalışanları ve bu bölgede yaşayan insanlar için faydalı olabilir.

Bu araştırma sonunda Ballakayati'de 23 familyaya ait 62 takson tespit edilmiştir. Gıda amaçlı kullanılan bitkilerin yöresel isimleri, kullanılan kısımları, kullanım şekilleri ve hazırlama yöntemleri ortaya çıkarılmıştır. Yerel halk bitkileri pişirerek ya da çiğ olarak tüketmektedirler. Vejetasyon döneminde topladıkları bitkileri taze olarak ya da kuruttuktan sonra bütün yıl kullandıkları görülmüştür. En yaygın kullanılan bitkiler *Juglans regia*, *Allium ampeloprasum*, *Prunus dulcis*, *Rubus sanctus*, *Thymus kotschyanus*, *Rheum ribes*, *Cydonia oblonga*, *Portulaca oleracea* ve *Crataegus meyeri* 'dir.

Araştırma alanımızın coğrafi yapısı, sağlık ve ulaşım olanaklarının zorlukla yapılması ve göçebe yaşam tarzını sürdüren çok sayıda insanın varlığı, bölge halkının yabani bitkileri kullanma talebini artırmıştır. Farklı etnik kökenlere sahip bölge halkının bitkiler için farklı isimler kullanması dikkat çekicidir. Yörede Kürtçe ağırlıklı olmak üzere Arapça ve Farsça bitki isimlerine rastlanmıştır. Irak'ta etnobotanik çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. Bununla birlikte yöre çevresindeki alanlarda birçok yabani bitkinin geleneksel kullanımları henüz kaydedilmemiştir.

Köylerden ilçe ve şehirlere göçün artması ve kentsel yerleşim alanlarındaki imkanlar nedeniyle bitki kullanım kültürü ile ilgili bilgiler unutulmuş ve kaybolmak üzeredir. Bu çalışmada Erbil- Ballakayati merkezinde yer alan köylerde bitki kullanımı oldukça düşüktür. Bununla birlikte, uzak köylerdeki bitkilerin kullanımı daha fazladır. Dolayısıyla böyle bir çalışma, yalnızca yüzyıllardır sergilenen bu kültürün kaydedilmesi, korunması ve birikiminden yararlanılması açısından önemlidir.

Çalışma sırasında, bu bölgenin bitki örtüsüne yönelik tehditler ve aşırı otlatma olduğu görülmüştür. Köylüler ve yöre halkı kışın ısınma amacıyla *Pinus* L., *Polpulus* L. ve *Quercus* L. gibi ağaçları kestikleri ve yabani bitkileri yemek hazırlamak için kullandıkları tespit edilmiştir. Bu, mali kaynakların yetersizliğinden ve yerel yönetim tarafından yakıt verilmediği içindir. Bahar mevsiminde köylüler tükettikleri bazı bitkileri toplamak için dağlara giderler. Dağlarda bazı bitkileri kökleriyle beraber çıkarır, bazı bitkilerin ise tohumlarını toplarlar. Yapılan bu bilinçsiz toplama

bitki çeşitlerinin azalmasına ve bitkilerin devamlılığı için tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle hükümet önlem almalı ve o bölge halkını bilinçlendirmelidir.

Ek 1: 1. Ad ve soyadı 2. Cinsiyet ve yaşı? 3. Telefon 4. Görüşme tarihi 5. Eğitim durumu 6. İkamet yeri 7. İkamet süresi. 8. Kullanılan bitkinin yerel adı nedir? 9. Bitkinin hangi kısımlarını kullanıyorsunuz? 10. Bitkiyi kullanıma nasıl hazırlıyorsunuz?

Çizelge 1. Ballakayati ilçesindeki yabani gıda bitkileri.

Nu	Bitki ailesi, bitki taksonu ve toplayıcı numarası	Yerel ad	Gıda olarak kullanılan parçalar	Kullanım şekli	UV
AMARYLLIDACEAE					
1	<i>Allium ampeloprasum</i> L. MK37	Kurada, Tareg	Soğan, Yaprak	Baharat olarak kullanılır, yoğurtlu yemeği yapılır, salatası yapılır	0.38
2	<i>Allium fedtschenkoii</i> Nabelek MK49	Lusha, Lushka	Soğan, Yaprak	Baharat olarak kullanılır, Salatası yapılır, dolması yapılır	0.12
3	<i>Allium macrochaetum</i> Boiss. & Hausskn. MK36	Sira Kewilka	Yaprak	Salatası yapılır peynir üretiminde kullanılır	0.09
ANACARDIACEAE					
4	<i>Pistacia eurycarpa</i> Yalt. MK28	Darbnawsh, Bnawshila	Meyve	Kahve olarak tüketilir, baharat olarak kullanılır	0.07
5	<i>Pistacia khinjuk</i> Stockss MK11	Daraban, Qaskwan	Meyve	Kahve olarak tüketilir, baharat olarak kullanılır	0.05
6	<i>Rhus coriaria</i> L. MK57	Dar trsh, Smaq	Meyve	Baharat olarak kullanılır	0.24
APIACEAE					
7	<i>Anethum graveolens</i> L. MK38	Doragh, Shwit	Yaprak	Baharat olarak kullanılır, salatası yapılır	0.12
8	<i>Apium graveolens</i> L. MK39	Karawz, Karafs	Toprak üstü kısımlar, Yaprak	Baharat olarak kullanılır, sebze yemeği yapılır	0.05
9	<i>Chaerophyllum macropodium</i> Boiss. MK114	Mandoke, Zre mendok, Bendoka	Toprak üstü kısımlar, Yaprak	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır, peynir üretiminde kullanılır	0.03

10	<i>Coriandrum sativum</i> L. MK10	Gzhnizh	Yaprak	Ayran içine atılır	0.03
11	<i>Eryngium bourgatii</i> Gouan MK50	Tesu	Kök	Kök soyulduktan sonra yenilir	0.03
12	<i>Falcaria vulgaris</i> Bernh. MK122	Kazya, Razyanay Kewi	Yaprak	Salatası yapılır	0.02
13	<i>Heracleum lasiopetalum</i> Boiss. MK15	Kashma, Kashm	Toprak üstü kısımlar, Yaprak	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır, peynir üretiminde kullanılır	0.05
14	<i>Pimpinella anthriscoides</i> Boiss. var. <i>anthriscoides</i> MK34	Alo	Yaprak	Baharat olarak kullanılır, yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.06
15	<i>Smyrniun cordifolium</i> Boiss. MK17	Qalandor	Gövde	Çiğ olarak yenilir	0.05
ASPHODELACEAE					
16	<i>Asphodelus albus</i> Mill. MK26	Srelk, Astrelk	Toprak üstü kısımlar	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.04
ASTERACEAE					
17	<i>Carduus pycnocephalus</i> L. AMK63	Kangra kara	Tohum	Kurutulan tohum kuruyemiş olarak yenilir	0.02
18	<i>Cynara cardunculus</i> L. MK113	Qalaghan, Artishu	Yaprak	Salatası yapılır	0.03
19	<i>Gundelia tournefortii</i> L. MK47	Kangr, Qngir	Yaprak, Kök	Gövde çiğ yenilir, yoğurtlu yemeği yapılır	0.25
20	<i>Sonchus oleraceus</i> L. MK62	Kalababoka	Toprak üstü kısım	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.04
21	<i>Tragopogon pratensis</i> L. MK21	Azpung, Azpun	Yaprak	Salatası yapılır	0.02
BORAGINACEAE					
22	<i>Anchusa azurea</i> Mill. MK8	Gormza, Golmza	Çiçek, Toprak üstü kısım	Bitki çayı yapılır, yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.08
BRASSICACEAE					
23	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik. MK2	Peqal, Kunda shwana	Toprak üstü kısım	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.06
24	<i>Lepidium sativum</i> L. MK41	Taratula, Taratiza	Yaprak	Salatası yapılır, turşusu yapılır	0.03

25	<i>Nasturtium officinale</i> R.Br. MK29	Kuzala, Peez, Tuzik	Yaprak	Salatası yapılır, çiğ olarak yenilir	0.14
CANNABACEAE					
26	<i>Celtis tournefortii</i> Lam. MK97	Tawk, Tawe	Meyve	Meyveleri yenilir	0.08
FABACEAE					
27	<i>Glycyrrhiza glabra</i> L. MK74	Memuk	Kök	Meyve suyu yapımında kullanılır	0.18
28	<i>Medicago rigidula</i> (L.) All. MK40a	Wenja, Yunja	Toprak üstü kısım	Çorba yapımında kullanılır	0.02
29	<i>Medicago sativa</i> L. subsp. <i>sativa</i> MK40b	Winja	Toprak üstü kısım	Çorba yapımında kullanılır	0.04
30	<i>Pisum sativum</i> L. MK 41a	Kalya khatuna	Meyve	Meyveleri yenilir	0.03
31	<i>Trifolium purpureum</i> Loisel. var. <i>purpureum</i> MK67	Sewara, Separa	Toprak üstü kısım	Çiğ yenilir	0.04
32	<i>Vicia narbonensis</i> L. MK120	Kalya gajota	Meyve	Çiğ yenilir	0.05
FAGACEAE					
33	<i>Quercus brantii</i> Lindl. MK22	Barw, Dara sur	Pelit	Çiğ yenilir	0.04
34	<i>Quercus infectoria</i> Oliv. AMK24	Dar maz, Mazu	Pelit	Çiğ yenilir	0.02
GERANIACEAE					
35	<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L' Hér MK76	Gya darzila	Toprak üstü kısım	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.03
JUGLANDACEAE					
36	<i>Juglans regia</i> L. MK105	Guiz, Gwez, Jeviz	Tohum	Çerez olarak yenilir, pasta ve tatlı yapımında kullanılır	0.39
LAMIACEAE					
37	<i>Mentha longifolia</i> (L.) L. MK85	Pung, Ping	Yaprak	Bitki çayı içilir, baharat olarak kullanılır, yoğurtlu yemeği yapılır, salatası yapılır	0.32
38	<i>Ocimum basilicum</i> L. MK112	Rehan	Yaprak	Bitki çayı içilir; baharat olarak kullanılır, salatası yapılır, taze yenmiş	0.14
39	<i>Origanum vulgare</i> L. MK81	Jatra kewilka	Yaprak	Bitki çayı içilir, baharat olarak kullanılır	0.20

40	<i>Phlomis lanceolata</i> Boiss. & Hohen. MK116	Bnazarda	Toprak üstü kısım	Bitki çayı içilir	0.02
41	<i>Thymus kotschyanus</i> Boiss. & Hohen. MK82	Jatra	Yaprak	Bitki çayı içilir; baharat olarak kullanılır	0.36
MALVACEAE					
42	<i>Malva sylvestris</i> L. MK91	Tolka, Paniroka	Yaprak, Toprak üstü kısım	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır	0.14
ONAGRACEAE					
43	<i>Epilobium parviflorum</i> Schreb. MK23	Punga kewilka	Çiçek, Yaprak	Bitki çayı içilir	0.02
44	<i>Epilobium hirsutum</i> L. MK84	Bora pung, Zra Pung	Çiçek, Yaprak	Bitki çayı içilir	0.01
ORCHIDACEAE					
45	<i>Dactylorhiza umbrosa</i> (Kar. & Kir.) Nevski MK53	Salma, Salmka	Soğan	Dolma yapımında kullanılır	0.04
POACEAE					
46	<i>Avena sterilis</i> subsp. <i>ludoviciana</i> (Durieu) Gillet & Magne MK2	Dulka	Tohum	Süt ve yoğurtla yenilir	0.04
47	<i>Setaria italica</i> (L.) P.Beauv. MK119	Klka rewi	Tohum	Pasta ve tatlı yapımında kullanılır	0.02
POLYGONACEAE					
48	<i>Rheum ribes</i> L. MK35	Rewas, Mam rewas	Gövde	Taze yenilir	0.34
49	<i>Rumex tuberosus</i> L. MK18	Trshoka	Yaprak	Salatası yapılır	0.28
PORTULACEAE					
50	<i>Portulaca oleracea</i> L. MK86	Parpena, Pirpar	Yaprak	Salatası yapılır, yoğurtlu ve sebze yemeği yapılır, peynir üretiminde kullanılır	0.31
PUNICACEAE					
51	<i>Punica granatum</i> L. MK88	Hanar	Meyve	Taze yenilir	0.11
RHAMNACEAE					
52	<i>Ziziphus jujuba</i> Mill. MK48	Snci, Sncu	Meyve	Taze yenilir	0.12

ROSACEAE					
53	<i>Prunus arabica</i> (Olivier) Meikle MK6	Kalashin	Meyve	Olgunlaşmamış meyveleri yenilir	0.10
54	<i>Prunus microcarpa</i> C.A. Mey MK59	Halhaluk, Blaluk	Meyve	Çiğ yenilir	0.07
55	<i>Crataegus meyeri</i> Pojark. MK30	Gewzh, Goizh	Meyve	Çiğ yenilir, reçeli yapılır, meyve suyu yapımında kullanılır	0.28
56	<i>Cydonia oblonga</i> Mill. MK110	Be, Bay, Bahe	Meyve	Çiğ yenilir, reçeli yapılır	0.33
57	<i>Prunus dulcis</i> (Mill.) D.A. Webb MK83	Badam, Chala	Tohum	Çerez olarak yenilir	0.37
58	<i>Rosa x dumalis</i> Bechst. MK61	Shilan, Gula zarda	Meyve	Reçeli yapılır	0.25
59	<i>Rosa heckeliana</i> Tratt. MK16b	Gula raz	Meyve, Çiçek	Reçeli yapılır	0.12
60	<i>Rosa gallica</i> L. MK16a	Gula Bakh	Meyve, Çiçek	Bitki çayı içilir, reçeli yapılır	0.07
61	<i>Rubus sanctus</i> Schreb. MK60	Drila, Tutrk, Dudrk	Meyve	Çiğ yenilir, reçeli yapılır, meyve suyu yapımında kullanılır	0.37
URTICACEAE					
62	<i>Urtica dioica</i> L. MK90	Gazgazka, Gazna	Yaprak	Yumurtalı yemeği ve sebze yemeği yapılır, çorba yapımında kullanılır	0.14

MK: Awara Mohammed Amin Mohammed Amin Kawarty.

Teşekkür

Yazarlar, "Ethnobotany in Ballakayati (Erbil – North Iraq" yüksek lisans tezinden üretilen bu makaleye mali destek sağlayan Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BÜBAP)'ne teşekkür etmektedir (Proje No: 506-236-2015).

5. Kaynaklar

Akgül, G., Yılmaz, N., Celep, A., Celep, F., Çakılcıoğlu, U., 2016. Ethnobotanical purposes of plants sold by herbalists and folk bazaars in the center of Cappadocia (Nevşehir, Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **15**, 103-108.

Baytop, T., 1999. Türkiye'de Bitkiler ile Tedavi, Geçmişte ve Bugün. Nobel Tıp Kitabevleri, İstanbul, 1-480.

Boesch, H.H., 1939. El-Iraq. Economic Geography Published Taylor and Francis., **15**, 325-361.

Bulut, G., Biçer, M., Tuzlacı, E., 2016. The folk medicinal plants of Yüksekova (Hakkari-Turkey). *Journal of Faculty of Pharmacy Istanbul University*, **46**, 115-124.

Bulut, G., Tuzlacı, E., 2013. An ethnobotanical study of medicinal plants in Turgutlu Manisa-Turkey. *Journal of Ethnopharmacology*, **149**, 633-647.

- Civelek, Ş., Türkoğlu, İ., 2000. Unknown medicinal plants in vicinity of Elazığ. *Firat University Journal of Health Sciences*, **14**, 379-388.
- Çakılcıoğlu, U., 2020. An ethnobotanical field study; Traditional foods production and medicinal utilization of *Gundelia* L. species in Tunceli (Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **19 (4)**, 714-718.
- Davis P.H., 1965–1985. Flora of Turkey and the East Aegean Islands. Vol 1-9. Edinburgh University Press, Edinburg, UK, 1-724.
- Davis,, P.H., Mill, R.R., Tan, K., 1988. Flora of Turkey and the East Aegean Islands. Vol 10. Edinburgh University Press, Edinburg, UK, 1-590.
- Demirel, S., Çakılcıoğlu, U., 2017. Identification of medical plants in Hittite cuneiform scripts. *Bellefen*, **291**, 305-328.
- Erecevit, P., Kirbağ S., 2017. Determination of some biological properties over *Kluyveromyces lactis* 1 of *Rheum ribes* L. (Rhubarb) as a traditional medicinal and food plant. *International Journal of Nature Life Sciences*, **1**, 22-31.
- Erecevit Sönmez, P., Kirbag, S., Çakılcıoğlu, U., 2020. Reviewing *Phlomis rigida* Labill From Turkey as a Antimicrobial Efficacy. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **24 (6)**, 1265-1271.
- Guest, E., Al-Rawi, A., 1966. Flora of Iraq, Pub. by Ministry of Agriculture of Republic of Iraq, Vol 1, Baghdad, 1-216.
- Güneş, S., Savran, A., Paksoy, M.Y., Çakılcıoğlu, U., 2018. Survey of wild food plants for human consumption in Karaisalı (Adana-Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **17**, 290-298.
- Harshberger, J.W., 1896. The purposes of ethno-botany. *Botanical Gazette*, **21**, 146-154.
- Karaköse, M., Akbulut, S., Özkan, Z.C., 2019. Ethnobotanical study of medicinal plants in Torul District, Turkey. *Bangladesh Journal of Plant Taxonomy*, **26**, 29-37.
- Kaval, İ., Behçet, L., Çakılcıoğlu, U., 2015. Survey of wild food plants for human consumption in Geçitli (Hakkari, Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **14**, 183-190.
- Kawarty, A.M.A.M.A., Behçet, L., Çakılcıoğlu, U., 2020. An ethnobotanical survey of medicinal plants in Ballakayati (Erbil, North Iraq). *Turkish Journal of Botany*, **44**, 345-357. doi.org/10.3906/bot-1910-39.
- Korkmaz, M., Karakuş, S., Selvi, S., Çakılcıoğlu, U., 2016. Traditional knowledge on wild plants in Üzümlü (Erzincan-Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **15**, 538-545.
- Mati, E, de Boer, H., 2010. Contemporary knowledge of dye plant species and natural dye use in Kurdish Autonomous Region Iraq. *Economic Botany*, **64**, 137-148.
- Mati, E., de Boer, H., 2011. Ethnobotany and trade of medicinal plants in the Qaysari Market, Kurdish Autonomous Region, Iraq. *Journal of Ethnopharmacology*, **133 (2)**, 490-510. doi: 10.1016/j.jep.2010.10.023.
- Muthu, C., Ayyanar, M., Raja, N., 2006. Ignacimuthu S, Medicinal plants used by traditional healers in Kancheepuram district of Tamil Nadu, India. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, **2**, 43. doi: 10.1186/1746-4269-2-43.
- Mükemre, M., Behçet, L., Çakılcıoğlu, U., 2015. Ethnobotanical study on medicinal plants in villages of Çatak (Van-Turkey). *Journal of Ethnopharmacology*, **166**, 361-374.
- Mükemre, M., Behçet, L., Çakılcıoğlu, U., 2016. Survey of wild food plants for human consumption in villages of Çatak (Van-Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **15**, 183-191.
- Nadiroğlu, M., Behçet, L., 2018. Traditional food uses of wild plants among the Karlıova (Bingöl-Turkey). *International Journal of Nature Life Sciences*, **2**, 57-71.
- Polat, R., Cakilcioglu, U., Satil, F., 2013. Traditional uses of medicinal plants in Solhan (Bingöl-Turkey). *Journal of Ethnopharmacology*, **148**, 951-963.
- Polat, R., Cakilcioglu, U., Ulsan, M.D., Paksoy, M.Y., 2015. Survey of wild food plants for human consumption in Elazığ (Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **14**, 69-75.

- Polat, R, Güner, B., Yüce-Babacan, E., Çakılcıoğlu, U., 2017. Survey of wild food plants for human consumption in Bingöl (Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **16**, 378-384.
- Rechinger, K.H., 1965-1977. Flora of Iranica. Graz-Austria: Akademisch Druck u Verlangsanstalt, 1-231.
- Saman, A.A., Ali, A.A., 2015. Ethnobotany of the Hawraman Region of Kurdistan Iraq. *Harvard Papers in Botany*, **20**, 85-89.
- Satıl, F., Açar, M., 2020. Ethnobotanical Use of *Stachys* L. (Lamiaceae) Taxa in Turkey. *International Journal of Nature Life Sciences*, **4 (2)**, 66-86.
- Satıl, F., Selvi, S., 2020. Ethnobotanical features of *Ziziphora* L. (Lamiaceae) Taxa in Turkey. *International Journal of Nature Life Sciences*, **4**, 56-65.
- Selvi, S., Polat, R., Yuce-Babacan, E., Rahman, M.O., Çakılcıoğlu, U., 2019. Micromorphological and anatomical investigation on six species of *Onosma* L. (Boraginaceae) from Turkey. *Bangladesh Journal of Plant Taxonomy*, **26**, 69-81.
- Townsend, C.C., Guest, E., 1966-1985. Flora of Iraq. Ministry of Agriculture Republic of Iraq, Vol 1-4, Baghdad.
- Trotter, R.T., Logan, M.H., 1986. Informant consensus: a new approach for identifying potentially effective medicinal plants, In: *Plants in Indigenous Medicine and Diet, Behavioural Approaches*, edited by Etkin, N.L., Redgrave Publishing Company, Bredford Hills, NY, 1-336.
- Tukan, S.K., Takturi, H.R., Al-Eisavi, D.M., 1998. The use of wild plant edible plants in the Jordanian diet. *International Journal of Food Sciences Nutrition*, **49**, 225-235.
- Yerebasan, N., Kırçıl, E., Yılmaz, M.S., Çakılcıoğlu, A., Deniz, V., Demirkıran, D., 2020. A review of the traditional plant use culture in Elazığ (Turkey). *International Journal of Nature Life Sciences*, **5 (1)**, 1-10.
- Yüce-Babacan, E, Vitek, E., Çakılcıoğlu, U., 2017. Contributions to the Flora of Tunceli (Turkey). *International Journal of Nature Life Sciences*, **1**, 39-66.
- Zohary, M., 1966-1986. Flora Palaestina. Vol 1-4. Jerusalem Acedemic Press, Israel.

Gadobutrol'ün Sitokinezi Bloke Edilmiş Mikronükleus Tekniği ile Genotoksik ve Sitotoksik Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Hayal ÇOBANOĞLU¹

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Çanakkale.

e-posta: hayaltok@comu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9640-3354>

Geliş Tarihi: 08.02.2021

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Manyetik rezonans (MR) tıpta yaygın olarak kullanılan bir görüntüleme tekniğidir. Günümüzde dünya genelinde yapılan MR çekimlerin %40 kontrast madde kullanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmaya araştırma konusu olan gadobutrol MR görüntülemesinde kullanılan non iyonik, makrosiklik ve gadolinium bazlı bir kontrast maddedir. Bu çalışmada *in vitro* koşullarda insan periferik lenfositlerinde gadobutrol'ün genotoksik ve sitotoksik potansiyelinin olup olmadığı araştırıldı. Çalışmada genotoksikite değerlendirilmelerinde sıklıkla kullanılan sitokinezi bloke edilmiş mikronükleus yöntemi kullanıldı. Gönüllü donörlerden alınan periferik kan örneği ilacın 3 farklı konsantrasyonu (1, 5, 25 mM) ile 48 saat muamele edildi. Elde edilen sonuçlar, mikronükleus sıklığı bakımından tüm konsantrasyonlarda artış olduğunu ancak 5 ve 25 mM'lık konsantrasyondaki artışın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterdi ($p<0.05$; $p<0.01$ sırasıyla). Nükleoplasmik köprü ve nüklear bud sıklıklarında negatif kontrole göre anlamlı bir farklılık görülmedi ($p>0.05$). İlacın sitostatik etki bakımından da kontrole göre anlamlı bir değişikliğe neden olmadığı tespit edildi ($p>0.05$). Bu bulgular gadobutrol'ün sitotoksik bir potansiyelinin olmadığını ancak genotoksik potansiyelinin olabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler

Gadobutrol;
Mikronükleus;
Nükleoplasmik köprü;
Nüklear bud;
Sitotoksikite

Assesment of Genotoxic and Cytotoxic Potential of Gadobutrol by Using Cytokinesis-Blocked Micronucleus Assay

Abstract

Magnetic resonance is an imaging technique widely used in medicine. Today worldwide 40% of magnetic resonance imaging is made using contrast agent. Gadobutrol is a nonionic, macrocyclic and gadolinium based contrast agent for magnetic resonance imaging. In this *in vitro* study, it was aimed to investigate whether Gadobutrol has genotoxic and cytotoxic effects on human peripheral lymphocyte. In the study, cytokinesis-blocked micronucleus assay, which is frequently used in evaluating genotoxicity, was used. Peripheral blood samples from volunteer donors were treated with 3 different concentrations of the drug (1, 5, 25 mM) for 48 hours. The MN frequency caused by each concentration of gadobutrol was found to be higher than the negative control, but the increase in concentration of 5 and 25 mM was statistically significant ($p<0.05$; $p<0.01$ respectively). At the studied concentrations, nucleoplasmic bridge and nuclear bud values were not significant ($p>0.05$). It was determined that gadobutrol did not cause a significant change in terms of cytostatic values compared to control. These findings suggest that gadobutrol was non-cytotoxic but potentially genotoxic.

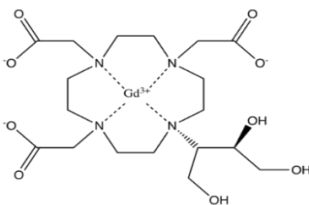
Keywords

Gadobutrol;
Micronucleus;
Nucleoplasmic bridge;
Nuclear bud;
Cytotoxicity

1. Giriş

Bilgisayarlı tomografi gibi X ışını bazlı görüntüleme için kullanılan iyonize radyasyonun insan hücrelerinde karsinogenik bir hasara neden olabileceği iyi bilinmektedir (Redding *et al.* 2017). Manyetik rezonans (MR), X ışını ve radyoizotop görüntülemeye göre daha güvenli bir alternatif olarak kabul edilen ve tıpta yaygın olarak kullanılan bir görüntüleme tekniğidir (Simi *et al.* 2008, Hill 2018). Ancak günümüzde, geleneksel olarak çocuklarda ve hamile kadınlarda iyonlaştırıcı radyasyon kullanımından kaçınmak için kullanılan MR görüntüleme tartışma konusudur. Çünkü insanlar üzerindeki olası uzun vadeli muhtemel biyolojik etkileri hakkında bilgi sınırlıdır (Redding *et al.* 2017). Buna karşın OECD 2014 verilerine göre MR görüntüleme sayısı tüm dünyada her geçen yıl artmaktadır (Int Kyn. 1). 2007-2012 yılları arasında MR görüntüleme cihazı kullanım oranı Avrupa Birliği ortalaması %38 artmış iken Türkiye ortalaması %134 oranında artmıştır (Int Kyn. 2).

Medikal görüntülemelerde vücut yapılarının kontrastını arttırmak için kontrast madde, yaklaşık 40 yıldır kullanılmaktadır. Günümüzde dünya genelinde yapılan MR çekimlerin %40'ı gadolinyumlu (Gd) kontrast madde kullanılarak yapılmaktadır (Rozenfeld and Podberesky 2018, Azimi *et al.* 2017). Gd, tıbbi görüntüleme, bir görüntünün kontrastını arttırmada faydalı bir iyonudur. Ancak canlılar için toksik bir iyon olduğu da bilinmektedir (Parant *et al.* 2019). Gadobutrol (Şekil 1) gibi MR görüntüleme için kullanılan gadolinyum bazlı kontrast maddelerde Gd iyonu başka moleküllere şelatlanarak toksisitesi azaltılmaktadır (Wack *et al.* 2012). Ancak bazı kontrast maddelerde Gd şelatlandığı moleküle sıkıca bağlanırken bazıları sıkı bağlanamazlar. Bu durum Gd iyonunun az ya da çok ortamda serbest kalmasına neden olur (Morcos 2008).



Şekil 1. Gadobutrol'ün kimyasal yapısı

Sitokinezi bloke edilmiş mikronükleus (CBMN) tekniği, insan ve memeli hücrelerinde kullanılan standart sitogenetik yöntemlerden biridir. Yöntem; kromozom kayıpları, kromozom kırıkları, apoptoz, nekroz, DNA yanlış tamiri ve sitostazi tespitine olanak sağlayan kapsamlı bir yöntemdir (Fenech 2007). Bu nedenle yöntem, pek çok ilacın genotoksik etkilerinin değerlendirildiği çalışmalarda kullanılmıştır (Rhoshdy and Shoman 2004, Battal vd. 2013, Tazehkand and Topaktaş 2015, Cobanoğlu vd. 2018, Cayir vd. 2020).

Dünya genelinde özellikle ülkemizde hızla artan MR çekimleri, bu çekimler için kullanılan kontrast maddelere çok sayıda insanın maruz kaldıklarını düşündürmektedir. Literatürde farklı yöntemler ile Gadobutrol'ün genotoksitesinin değerlendirildiği bazı çalışmalar vardır. Bu çalışmaların bazıları Gadobutrol'ün genotoksik potansiyeli olduğunu (Fiechter *et al.* 2012), bazıları ise genotoksik bir etkisinin olmadığını (Wack *et al.* 2012) rapor etmiştir. Buna karşın literatürde Gadobutrol'ün insan periferik lenfositlerinde *in vitro* genotoksitesine ait bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yüzden bu çalışmada Gadobutrol'ün *in vitro* koşullarda CBMN yöntemi ile insan periferik lenfositlerinde genotoksik ve sitotoksik potansiyelinin araştırılması amaçlandı.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada sürekli ilaç kullanımını gerektirecek kronik bir hastalığı olmayan sağlıklı iki bireyden steril heparinli tüpe alınan 3 mL periferik tam kan örneği kullanıldı. Kan örneği veren gönüllüden gönüllü onam formları alındı. Çalışmanın etik kurul izni "Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu" tarafından verildi (Karar No: 2020-08).

2.1 Negatif ve pozitif kontrol

Negatif kontrollere hiçbir ekleme yapılmadı. Pozitif kontrol olarak 0.5 µg/mL mitomisin-C (MMC, Sigma) kullanıldı.

2.2 Kimyasallar

Gadobutrol; 1.0 mmol/mL Gadovist'den (Bayer, Germany) elde edildi. Fetal kalf serumu, RPMI 1640

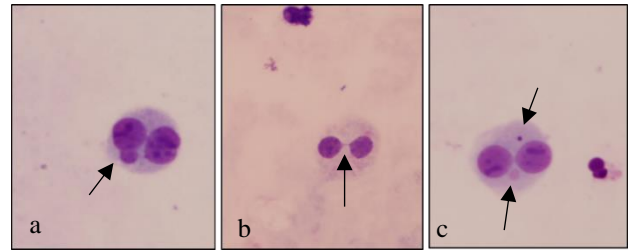
kültür medyumunu ve sitokalsin B (Cyt B); Sigma firmasından, giemsa, entellan metanol, potasyum klorür (KCl) ve asetik asit; Merck firmasından, fitohemaglutinin (PHA); Biological Industries firmasından temin edildi.

2.3 In vitro sitokinezi bloke edilmiş mikronükleus yöntemi

CBMN, Fenech tarafından belirtilen yöntemde küçük değişiklikler yapılarak uygulandı (Fenech 2000). Kirsch-Volders'a göre yaklaşık %60 sitotoksiste çalışabilecek en yüksek konsantrasyon olup bu konsantrasyonun altında en az 3 farklı konsantrasyon ile çalışılması gerekmektedir (Kirsch Volders *et al.* 2003). Yapılan ön denemelerde %60 sitotoksitenin altında toksite gösteren 3 farklı konsantrasyon ile çalışılmaya karar verildi (1, 5, 25 mM). Deneyler iki paralel olarak yapıldı. Gönüllü donörlerden alınan 0,5 mL periferik tam kan örneğine 4 mL kültür medyumunu, 0,2 mL PHA ve 1 mL fetal kalf serum eklendi. Kültürler 72 saat boyunca 37 °C etüvde tutuldu. Her bir kültüre, 24. saatte belirlenen konsantrasyonlarda (1, 5, 25 mM) Gadobutrol, 44. saatte ise sitokinezi durdurmak için 6 µg/mL Cyt-B eklendi. 72. saatin sonunda kültür sonlandırılıp fiksasyon aşamasına geçildi. Bu aşamada her bir kültür önce 1 kez hipotonik çözelti (0.075 M KCl) sonra 3 kez metanol /asetik asit ile yıkanarak fikse edildi. Slaytlar %5'lik Giemsa ile boyandı.

2.4 Mikroskopik değerlendirme

Slaytlar Fenech'in sayım kriterlerine göre ışık mikroskopunda (Carl Zeiss, Almanya) 100x büyütmede değerlendirildi (Fenech *et al.* 2003). Her bir donör, her bir konsantrasyon ve paralel kültür için 1000 çift çekirdekli hücre değerlendirildi. Her konsantrasyon için toplam 4000 çift çekirdekli hücre (2 donör × 2 paralel) değerlendirilerek ‰ mikronükleus (MN), ‰ Nükleoplasmik köprü (NPB) ve ‰ Nüklear bud (NBUD) sayıları tespit edildi (Şekil 2).

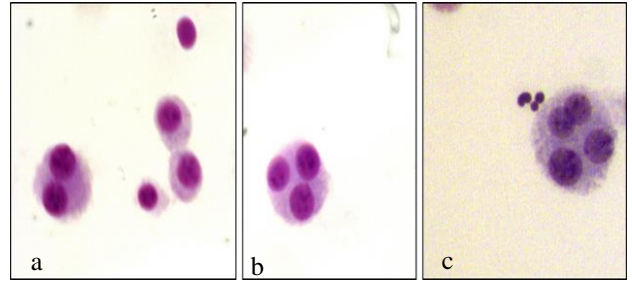


Şekil 2. (a) Nüklear budlu çift çekirdekli lenfosit (b) nükleoplasmik köprülü çift çekirdekli lenfosit (c) mikronükleuslu çift çekirdekli lenfosit

Hücre proliferasyon indeksi (CBPI) değerleri için 500 hücre her konsantrasyon için değerlendirildi ve 1, 2, 3, 4 çekirdekli hücre sayıları (Şekil3) tespit edilip CBPI değerleri elde edildi. CBPI değerleri aşağıdaki formül ile hesaplandı (Eastmond and Tucker 1989).

$$(1 \times M1) + (2 \times M2) + (3 \times M3) + (4 \times M4) / N \quad (1)$$

M1, M2, M3 ve M4 sırasıyla 1, 2, 3, ve 4 çekirdekli hücre sayılarını, N ise değerlendirilen toplam hücre sayısını temsil ediyor. % sitostazi ise Lorge (2008)'e göre hesaplandı.



Şekil 3. 1, 2, 3, 4 çekirdekli lenfositler

2.5 İstatistiksel analiz

Negatif kontrol ile muamele gruplarında elde edilen verilerin karşılaştırılması amacıyla Kruskal Wallis testi uygulandı ve daha sonra Dunnet Testi uygulanarak farklılıklar belirlendi. Bu amaçla, Graph PadPrism istatistik programı kullanıldı.

3. Bulgular

Bu çalışmada insan periferik lenfositlerinde *in vitro* koşullarda CBMN yöntemi ile Gadobutrol'ün genotoksik ve sitotoksik etkileri çalışıldı. Genotoksik değerlendirme için MN, NPB ve NBUD parametreleri, sitostatik değerlendirme için sırasıyla CBPI ve %sitostazi verileri kullanıldı. Elde edilen sonuçlar; Gadobutrol'ün MN sıklığını tüm

konsantrasyonlarda arttırdığını ve bu artışların 5 ve 25mM konsantrasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterdi (sırasıyla $p<0.05$; $p<0.01$). Ayrıca çalışılan tüm konsantrasyonlarda (1, 5, 25mM) gadobutrolün NBUD sıklığını negatif kontrole göre arttırdığı tespit edildi ancak bu artışların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görüldü ($p>0.05$). Gadobutrol'ün çalışılan konsantrasyonlarda NPB oluşumu üzerine bir etkisinin olmadığı ($p>0.05$) ve 5 ve 25 mM konsantrasyonlarında CBPI değerlerini düşürdüğü ancak bu azalmanın da istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edildi ($p>0.05$) (tablo 1, tablo 2). Ayrıca lineer regresyon analizi yapıldı ve hiçbir parametrede doza bağlı bir artış görülmedi ($p>0.05$).

Çizelge 1. Gadobutrol'ün insan peripheral lenfositlerinde MN, NPB ve NUD sıklıkları üzerine etkileri

Kons	DHS	Ort % MN	Ort % NPB	Ort % NBUD
NK	4000	18 ± 1.4	3.3 ± 0.4	2.3 ± 0.4
MMC(0,5 µg/mL)	4000	150	3	1
1 mM	4000	25.8 ± 2,5	4.3 ± 2.5	3 ± 2.8
5 mM	4000	28.3* ± 1,1	2.8 ± 1,8	5.3 ± 1.1
25 mM	4000	31.3** ± 1.8	1.8 ± 1.1	3.8 ± 2.5

Kısaltmalar: Kons: konsantrasyon, DHS: Değerlendirilen toplam hücre sayısı, MMC: mitomisin C, NK: negatif kontrol, MN: mikronükleus, NPB: nükleoplazmik köprü, NBUD: nüklear bud, Ort: ortalama, * $p<0.05$, ** $p<0.01$

Çizelge 2. Gadobutrol'ün CBPI üzerine etkileri

Konsantrasyon	DHS	CBPI	%Sitostazi
NK	1000	1.60	-
0,5 µg/mL MMC	-	-	-
1 mM	1000	1.60	0
5 mM	1000	1.54	10
25 mM	1000	1.49	18

Kısaltmalar: DHS: Değerlendirilen toplam hücre sayısı MMC: mitomisin C, NK: negatif kontrol, CBPI: hücre proliferasyon indeksi

4. Tartışma ve Sonuç

Gadobutrol'ün çalışılan konsantrasyonlarda sitotoksik bir etkisi gözlenmedi. Benzer şekilde NBUD ve NPB değerleri üzerinde anlamlı bir

değişikliğe de neden olmadığı görüldü. Ancak gadobutrol'ün MN oluşumunu 5 ve 25mM konsantrasyonlarda anlamlı derecede arttırdığı tespit edildi.

Genotoksikolojik biyomonitoring, insanlarda kimyasal maruziyet ile oluşan genetik riskin değerlendirilmesinde kullanılan faydalı bir araçtır (Bolognesi 2003). Çünkü genotoksik potansiyel, dejeneratif hastalıklar, üreme toksikolojisi ve kasinogenite gibi uzun süreli etkiler için temel risk faktörüdür (Bolognesi 2011). Anlamlı derecede artmış MN, NPB ve NBUD sıklıkları genomik kararsızlığın biyo-belirteçleridir (Fenech 2002). MN; asentrik kromozom kırıklarından oluşabildiği gibi tam kromozom kayıpları ile de meydana gelebilmektedir ayrıca NPB kırılmaları da MN oluşum mekanizmaları arasında yer almaktadır. NPB; DNA yanlış tamir mekanizması ve/veya telomer uç füzyonu ile oluşan disentrik kromozomları ile oluşmaktadır. NBUD'lar ise gen amplifikasyonlarının indikatörleridir (Fenech 2006). Wack ve ark. (2012) Gadobutrol'ün genotoksisitesini bakteriyal mutajenite testi ve Ames testi ile çalışmışlar. Çalışmalarında her iki test sonuçlarına göre gadobutrolün genotoksik bir potansiyelinin olmadığı, ilacın güvenli bir ilaç olduğu ve tanı amaçlı kullanılan hastalar için bir sağlık riski oluşturmadığı rapor edilmiştir. Ancak bir başka çalışma Fiechter ve ark. (2013) tarafından kontrastlı (gadobutrol) kardiyak MR çekimi yapılacak 20 gönüllü hasta ile planlanmıştır. Gadobutrol verilmeden önce ve verilir çekim bittikten sonra alınan kan örnekleri ile yapılan çalışmada kontrastlı kardiyak MR'ın lenfositlerde DNA çift zincir kırıklarını istatistiksel olarak anlamlı derecede arttırdığı tespit edilmiştir. Fiechter ve ark. (2013)'ün elde ettikleri sonuçlar Wack ve ark. (2012)'nin elde ettikleri sonuçlar ile çelişmekte ancak bu çalışmada elde edilen sonuçlarla kısmen örtüşmektedir. Literatürde Gadobutrol'ün genotoksisitesine ait başka bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak çeşitli görüntüleme tekniklerinde kontrast madde olarak kullanılan bazı başka ilaçlarla yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Azimi ve ark. yaptıkları bir çalışmada; bilgisayarlı tomografide (BT) kontrast madde olarak kullanılan omnipaque ve visipaque

enjeksiyonundan önce ve çekim bitikten 30 dakika sonra hastalardan aldıkları kan örnekleri ile CBMN ve komet yöntemleri kullanılarak bu kontrast maddelerin muhtemel genotoksitesilerini değerlendirmişler. Bu çalışmada kontrastsız abdominal BT çekimi yapılan 15 hastadan oluşan grup, kontrol grubu olarak seçilmiş. Çalışmada non-iyonik kontrast maddeler olan omnipaque ve visipaque ilaçlarının MN sıklığını ve DNA hasarını anlamlı derecede uyardıkları rapor edilmiştir (Azimi 2017). *In vitro* bir başka çalışmada iyonik (diatrizoate, ioxaglate) ve non-iyonik (iohexol, iosimide, iopromide, iotrolan) kontrast maddeler ile 48 saat muamele edilen periferik kan örneklerinde kontrast maddelerin MN sıklığına etkileri değerlendirilmiştir. Test edilen tüm kontrast maddelerin MN sıklığını istatistiksel olarak anlamlı derecede arttırdığı rapor edilmiştir (Parvez *et al.* 1986). Parvez ve ark. (1986)'nın elde ettiği bu sonuçlar, çalışmamızda test edilen gadobutrol'ün genotoksitesine ait sonuçlar ile uyumludur.

Bu güncel çalışmada, Non-iyonik makrosiklik kontrast madde olan gadobutrolün insan periferik lenfositlerinde MN sıklığını anlamlı derecede arttırmış olması genotoksik olabileceğini göstermektedir. Gadobutrol makrosiklik guruba dahil bir kontrast maddedir. Bu guruba dahil kontrast maddelerin şelatlandıkları moleküllere sıkıca bağlandıkları ve ortama lineer guruba dahil kontrast maddelerden daha az serbest Gd iyonu bıraktıkları bilinmektedir. (Morcos 2008). Yaşayan tüm organizmalar için yüksek derecede toksik olduğu bilinen Gd iyonunun, oksidatif stresi ve apoptozu uyardığını, reaktif oksijen türlerini arttırdığını rapor eden çalışmalar vardır (Xia *et al.* 2011, Parant *et al.* 2019). Bu çalışmada elde edilen gadobutrolün genotoksik olabileceğine dair sonucun, ortama az da olsa bırakılan serbest Gd iyonunun yukarıda özetlenen etkilerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, gadobutrolün sitotoksik bir potansiyelinin olmadığı ancak genotoksik bir potansiyelinin olabileceği görüldü. Ancak konunun farklı mekanizmalarla oluşan genetik hasarların indikatörü farklı yöntemler ile de araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- Azimi, S., Mozdarani, H. and Mahmoudzadeh, A., 2017. Induction of DNA damage, apoptosis and micronuclei in peripheral blood lymphocytes following injection of contrast media in patients with abdominal CT scan. *International Journal of Radiation Research*, **15(2)**, 149-55.
- Battal, D., Aktas, A., Sungur, MA., Kadioglu, E., Derici, EE., Sahin, NO. and Saygi, S., 2013. In vivo genotoxicity assessment of sertraline by using alkaline comet assay and the cytokinesis-block micronucleus assay. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, **113(5)**, 339-46.
- Bolognesi, C., 2003. Genotoxicity of pesticides: a review of human biomonitoring studies. *Mutation Research*, **543(3)**, 251-72.
- Bolognesi, C., Creus, A., Ostrosky, WP. and Marcos, R., 2011. Micronuclei and pesticide exposure. *Mutagenesis*, **26(1)**, 19-26.
- Cobanoğlu, H., Coskun, M., Çayır, A. and Coskun, M., 2018. In vitro genotoxic and cytotoxic effects of doxepin and escitalopram on human peripheral lymphocytes. *Drug and Chemical Toxicology*, **41(2)**, 238-44.
- Çayır, A., Cobanoğlu, H. and Coskun, M., 2020. Assessment of the genotoxic potential of a migraine-specific drug by comet and cytokinesis-block micronucleus assays. *Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology*, **16(5)**, 441-6.
- Eastmond, DA. and Tucker, JD., 1989. Identification of aneuploidy-inducing agents using cytokinesis-blocked human lymphocytes and an antikinetochore antibody. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, **13(1)**, 34-43.
- Fenech, M., 2002. Chromosomal biomarkers of genomic instability relevant to cancer. *Drug Discovery Today*, **7(22)**, 1128-37.
- Fenech, M., 2006. Cytokinesis-block micronucleus assay evolves into a "cytome" assay of chromosomal instability, mitotic dysfunction and cell death. *Mutation Research Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, **600(1-2)**, 58-66.

- Fenech, M., 2007. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. *Nature Protocols*, **2(5)**, 1084.
- Fenech, M., Chang, WP., Kirsch-Volders, M., Holland, N., Bonassi, S. and Zeiger, E., 2003. HUMN Project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, **534(1-2)**, 65-75.
- Fenech, M., 2000. The in vitro micronucleus technique. *Mutation Research*, **455**, 81–95.
- Fiechter, M., Stehli, J., Fuchs, TA., Dougoud, S., Gaemperli, O. and Kaufmann, PA., 2013. Impact of cardiac magnetic resonance imaging on human lymphocyte DNA integrity. *European Heart Journal*, **34(30)**, 2340-5.
- Hill, MA., 2018. Cardiac MR imaging genotoxicity? *European Heart Journal*, **39**, 313–315.
- Kirsch-Volders, M., Sofuni, T., Aardema, M., Albertini, S., Eastmond, D., Fenech M., Ishidate, M., Kirchner, S., Lorge, E., Morita, T., Norppa, H., Surrallés, J., Vanhauwaert, A. and Wakata, A., 2003. Report from the in vitro micronucleus assay working group. *Mutation Research*, **540**, 153–163.
- Lorge, E., Hayashi, M., Albertini, S. and Kirkland, D., 2008. Comparison of different methods for an accurate assessment of cytotoxicity in the in vitro micronucleus test: I. Theoretical aspects. *Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, **655(1-2)**, 1-3.
- Morcos, SK., 2008. Extracellular gadolinium contrast agents: differences in stability. *European Journal of Radiology*, **66**, 175–179.
- Parvez, Z., Kormano, M., Moncada, R. and Eklund, R., 1986. Contrast media-induced chromosomal damage in human lymphocyte cultures. *Investigative Radiology*, **21(11)**, 864-9.
- Parant, M., Sohm, B., Flaya, J., Perrat, E., Chuburu, F., Cadiou, C., Rosin, C. and Cossu-Leguille, C., 2019. Impact of gadolinium-based contrast agents on the growth of fish cells lines. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **182**, 1-7.
- Reddig, A., Fatahi, M., Roggenbuck, D., Ricke, J., Reinhold, D., Speck, O. and Björn, F., 2017. Impact of in vivo high-field-strength and ultra-high-field-strength MR imaging on DNA double-strand-break formation in human lymphocytes. *Radiology*, **282(3)**, 782-9.
- Roshdy, HM. and Shoman, TM., 2004. Cytogenetic and developmental effects of antidepressant drug (Cipralex) on female mice and embryos. *The Egyptian Journal of Hospital Medicine*, **17(1)**, 63-9.
- Simi, S., Ballardini, M., Casella, M., De Marchi, D., Hartwig, V., Giovannetti, G., Vanelloc, N., Gabbriellini, S., Landinich, L. and Lombardi, M., 2008. Is the genotoxic effect of magnetic resonance negligible? Low persistence of micronucleus frequency in lymphocytes of individuals after cardiac scan. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, **645(1-2)**, 39-43.
- Tazehkand, MN. and Topaktas, M., 2015. The in vitro genotoxic and cytotoxic effects of remeron on human peripheral blood lymphocytes. *Drug and Chemical Toxicology*, **38(3)**, 266-71.
- Wack, C., Steger-Hartmann, T., Mylecraine, L. and Hofmeister, R., 2012. Toxicological safety evaluation of gadobutrol. *Investigative Radiology*, **47(11)**, 611-623.
- Xia, Q., Feng, X., Huang, H., Du, L., Yang, X. and Wang, K., 2011. Gadolinium-induced oxidative stress triggers endoplasmic reticulum stress in rat cortical neurons. *Journal of Neurochemistry*, **117**, 38-47.

İnternet Kaynakları

1-https://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/magnetic-resonance-imaging-mri-exams-total-2014-1_mri-exam-total-table-2014-1-en (04.02.2021)

2-
<https://www.saglikaktuel.com/d/file/35c966a9f1d343909d4d0858bec69333.pdf> (04.02.2021)

Zn²⁺ İyonları ile Çapraz Bağlı Sodyum Karboksimetil Selüloz Kürelerden Flurbiprofenin Kontrollü Salımı

Emine BULUT

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Afyonkarahisar.

e-posta: ebulut@aku.edu.tr ID: <https://orcid.org/0000-0002-1337-9182>

Geliş Tarihi: 01.03.2021

Kabul Tarihi: 08.06.2021

Öz

Anahtar kelimeler

Sodyum karboksimetil selüloz;
Kontrollü ilaç salımı;
Flurbiprofen;
Küre

Çalışmada, steroid olmayan anti-inflamatuar ilaç olan flurbiprofeni (FBP) kapsüllemek için sodyum karboksimetil selüloz (NaCMC) küreler Zn²⁺ iyonları ile çapraz bağlanarak elde edildi. Elde edilen küreler Fourier transform infrared (FTIR) spektroskopisi ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ile karakterize edildi ve çapları optik mikroskop kullanılarak ölçüldü. Ayrıca, kürelerin denge şişme dereceleri, tutuklama değerleri, küre verim değerleri ve salım profilleri değerlendirildi. Küre verimi, tutuklama verimi ve FBP salımı üzerine NaCMC derişiminin, FBP yüklemesinin ve pH'nın etkisi incelendi. Flurbiprofenin kürelerden salımı pH 1.2 ortamında çok az iken, pH 7.4 bağırsak ortamında ise kontrollü bir şekilde gerçekleşti. NaCMC derişimi ve FBP yüklemesi arttıkça, kürelerden FBP salımı azaldı ve en yüksek ilaç salımı, NaCMC derişimi % 2 ve ilaç yüklemesi % 10 olan kürelerde gözlemlendi. Salım kinetikleri çoğunlukla Durum II olarak tanımlandı.

Controlled Release of Flurbiprofen from Sodium Carboxymethyl Cellulose Spheres Crosslinked with Zn²⁺ Ions

Abstract

Keywords

Sodium carboxymethyl cellulose;
Controlled drug release;
Flurbiprofen;
Sphere

In the study, sodium carboxymethyl cellulose (NaCMC) spheres were obtained by crosslinking Zn²⁺ ions to encapsulate flurbiprofen (FBP), non-steroid anti-inflammatory drug. The spheres obtained were characterized by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC) and their diameters were measured using an optical microscope. In addition, equilibrium swelling degrees, entrapment efficiencies, sphere yield values and release profiles of the spheres were evaluated. The effects of NaCMC concentration, FBP loading and pH on sphere yield, entrapment efficiency and FBP release were investigated. The release of flurbiprofen from the spheres was very low in pH 1.2 environment, whereas the release occurred in a controlled manner in the pH 7.4 intestinal environment. As the NaCMC concentration and FBP loading increased, FBP release from the spheres decreased and the highest drug release was observed in spheres with a NaCMC concentration of 2% and a drug loading of 10%. The release kinetics were mostly described as Case II.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Kontrollü ilaç salım teknolojisi, son yıllarda multi-disipliner bilim insanlarının katkılarıyla hızlı bir şekilde gelişen alanı temsil etmektedir (Mallikarjuna *et al.* 2013). İlaç salım sistemlerinde kapsülleme için kullanılan doğal veya sentetik polimerler, biyolojik olarak biyouyumlu olmaları, biyolojik parçalanabilirlik özellikleri ve uzun vadeli ilaç güvenliği sağlaması gibi mükemmel özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Wang *et al.* 2012).

Özellikle doğal polimerler, ucuz olmaları, toksik özellik göstermemeleri ve kolayca bulunabilmeleri sebebiyle sentetik polimerlere kıyasla pek çok avantaja sahiptir (Bulut, 2020 a). Selüloz, doğada en bol bulunan ve yenilenebilir bir polimer türüdür. Bununla birlikte selüloz lifleri, molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağları yaparak kristal bölgeler içerir; bu nedenle selüloz, suda çözünmez ancak kristallığı fraksiyon kaynağına bağlı olarak değişir (Ramesh Babu *et al.* 2010). Suda çözünür bir

selüloz türevi olan sodyum karboksimetil selüloz (NaCMC), mükemmel biyo-yapışkan özelliğiyle biyolojik olarak parçalanabilen biyouyumlu bir polisakkarit polimerdir ve bu özellikleri sayesinde kontrollü ilaç salım sistemleri için muazzam bir potansiyele sahiptir (Kim *et al.* 2012, Akalin ve Pulat 2018). Ayrıca tıp, gıda, deterjan, tekstil, kağıt, tarım vb. birçok alanda da geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Bulut, 2020 b). Bu polisakkaritin zincirlerinde hidrofilik karboksil grupları (-COO⁻) bulunur (Pourjavadi *et al.* 2006) ve bu karboksil grupları çok değerlikli metal katyon çözeltilerinde kolaylıkla çapraz bağlanır (Li *et al.* 2009). Polisakkaritlerin iki değerlikli/çok değerlikli katyonlarla (Zn²⁺, Ba²⁺, Ca²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺, Sr²⁺, Cd²⁺, Co²⁺ ve Ni²⁺) çapraz bağlanması, bir çift elektronun bir elektron vericiden bir elektron alıcıya transfer edilmesiyle oluşur ve bu tür polimer-metal kompozit malzemeler, oral ilaç salım sistemlerinden sürekli salım elde etmek için kullanılmaktadır. Bunlardan Zn yumuşak bir metaldir, iyonu COO⁻ gruplarıyla hidrasyona dirençli kovalent benzeri koordine bağlar oluşturur (Raut *et al.* 2013). Bu nedenle, iki değerlikli çinko (Zn²⁺), NaCMC kürelerini hazırlamak için uygun bir iyondur. Önceki bir çalışmamızda (Bulut ve Şanlı 2016), poli(vinil alkol)-aşı-akrilamid/sodyum aljinat/sodyum karboksimetil selüloz mikrokürelerden Alzheimer ilacı olan donepezil hidroklorürün salımı çalışıldı. Blend mikroküreler Al³⁺, Zn²⁺, Ca²⁺ ve Fe³⁺ iyonları ve glutaraldehit ile çapraz bağlanarak hazırlandı ve bu mikrokürelerden donepezil hidroklorür salımına çapraz bağlayıcı tipinin etkisi araştırıldı. Taha ve arkadaşları (Taha *et al.* 2008) yaptıkları çalışmalarında çinko ve kalsiyum iyonları ile iyonik çapraz bağlı aljinat boncuklar elde ettiler. Çalışmalarında, kalsiyum iyonlarının sert elektrofiller olduğunu ve bu nedenle karboksilatlarla elektrostatik çekimler yoluyla etkileşime girdiğini, bu da kolaylıkla hidratlaşma eğiliminde olduğunu ve bu nedenle sulu koşullar altında boncukların parçalandığını, öte yandan, daha yumuşak çinko iyonlarının, hidrasyona daha dirençli kovalent benzeri koordine bağlar oluşturma eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir.

Bu çalışmada, kontrollü bir ilaç salım profili elde etmek için oral olarak alınabilen flurbiprofen (FBP)

içeren NaCMC blend kürelerin hazırlanması amaçlanmıştır. Suda çözünürlüğü (22 ° C'de 8 mg/L) düşük bir ilaç olan FBP, steroid olmayan anti-inflamatuar ilacın fenilalkanoik asit türevidir ve artrit rahatsızlıklarının tedavisinde sıklıkla kullanılır (Malipeddi *et al.* 2016, Bulut 2020 b). Diğer steroid olmayan anti-inflamatuar ilaçlar gibi, bu ilacın da oral yoldan verilmesi gastrointestinal düzeyde olumsuz yan etkilere neden olmaktadır (Cryer *et al.* 1998). Bu nedenle gastrointestinal problemler ve diğer yan etkilerin üstesinden gelebilmek için, ilaç iyonik çapraz bağlı kürelere hapsedilebilir.

Çalışmada, FBP içeren NaCMC küreler, sıvıda olgunlaştırma yöntemi ile Zn²⁺ iyonları ile çapraz bağlanarak hazırlandı. FBP yüklü kürelerin tutuklama verimi, küre verimi, partikül çapı, salım özellikleri ve stabilitesi belirlendi. İlaç yüklü kürelerden FBP salımı ve boş kürelerin denge şişme dereceleri, pH 1.2 (0.1 N HCl) ve pH 7.4 fosfat tampon çözeltilerinde gerçekleştirildi. Polimer derişimi, FBP yüklemesi ve pH'nın FBP salımı üzerindeki etkisi araştırıldı.

2. Materyal ve Metot

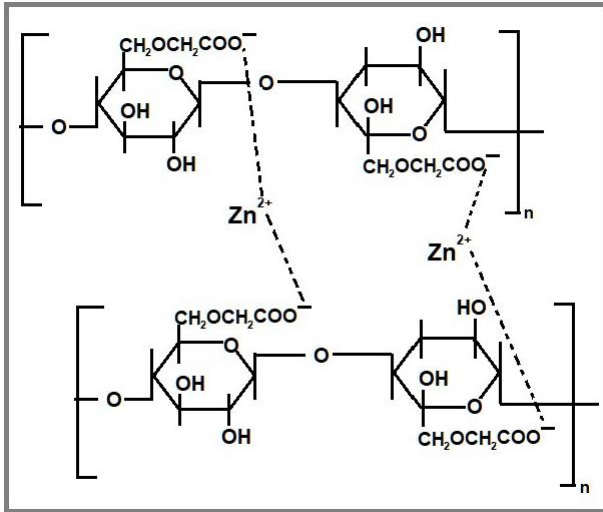
2.1 Denejde Kullanılan İlaç ve Kimyasal Maddeler

Etken madde olarak kullanılan flurbiprofen, Atabay Firmasından (İstanbul, Türkiye) hediye olarak alınmıştır. Kapsülleme materyali olarak kullanılan NaCMC (orta viskozite) ve çapraz bağlayıcı ZnCl₂ Sigma-Aldrich firmasından (St. Louis, ABD) satın alındı. Salım ortamı (pH 1.2, mide ortamı) hazırlamada kullanılan hidroklorik asit, pH ayarlamada kullanılan sodyum hidroksit, pH 7.4 fosfat tamponu hazırlamada kullanılan Na₂HPO₄ ve NaH₂PO₄ Merk'ten (Darmstadt, Germany) temin edilmiştir.

2.2 NaCMC Kürelerin Hazırlanması

Zn²⁺ iyonları ile çapraz bağlı küre formülasyonları sıvıda olgunlaştırma yöntemine göre elde edildi (Bulut 2021). İlk olarak, NaCMC'un % 2'lik (m/v) çözeltisi saf suda gece boyunca bir manyetik karıştırıcıda (Nuve, Turkey) karıştırılarak hazırlandı. Bu polimer çözeltisine gerekli miktarda ilaç ilave edilerek 12 saat boyunca karıştırıldı. Bu karışım

belirli derişimdeki ZnCl₂ çözeltisine damla damla ilave edilerek elde edilen boncuklar hafifçe karıştırılarak sertleştirildi ve karıştırmaya 10 dakika boyunca devam edildi. Daha sonra, üretilen boncuk küreler çözeltisinden süzülerek ayrıldı ve fazla ZnCl₂'ü uzaklaştırmak için tekrar tekrar su ile yıkandı. Küreler teflon bir plakada oda sıcaklığında kurutulduktan sonra, 40 °C'de bir etüvde (Memmert, Germany) tamamen kurutuldu. FBP içermeyen boş küreler de şişme derecelerini belirlemek için aynı şekilde hazırlandı. Her formülasyondan on tane kürenin çapı, bir optik mikroskop (Olympus CH20BIMF200, Japan) kullanılarak ölçüldü. Küre hazırlama koşulları Çizelge 1'de özetlenmiştir. NaCMC'un ZnCl₂ ile olası reaksiyon mekanizması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. NaCMC'un Zn²⁺ iyonları ile olası çapraz bağlanma reaksiyon mekanizması.

2.3 İlaç İçeriğinin Belirlenmesi

Çalışmada, tamamen kuru kürelerin FBP içeriği pH 7.4 fosfat tamponu çözeltisinde analiz edilmiştir. Belirlenen miktarda FBP yüklü kuru küreler, bir agat havanda toz haline getirildi ve 4 saat boyunca oda sıcaklığında, 100 mL pH 7.4 fosfat tamponu içinde ekstrakte edildi. 4 saat sonra, polimer süspansiyonu filtre kağıdından süzülerek ayrıldı ve süzüntü toplandı. Süzüntüdeki FBP içeriği, 247 nm dalga boyunda ultraviyole görünür bölge spektrofotometresi (Shimadzu UV-1700 Pharma) ile ölçüldü ve standart derişimlere sahip bir seri FBP

çözeltisinin kalibrasyon eğrisi kullanılarak derişimlere geçildi. Tutuklanma verimliliği (TV) yüzdesi aşağıdaki denkleme (Bulut, 2020 a) göre hesaplandı:

$$TV (\%) = \frac{\text{Gerçek FBP miktarı}}{\text{Teorik FBP miktarı}} \times 100 \quad (1)$$

2.4 Kürelerin Denge Şişme Derecelerinin Belirlenmesi

Boş kürelerin denge şişme derecelerini belirlemek için belirli miktardaki örnekler pH 1.2 (0.1 N HCl) ve pH 7.4 fosfat tamponu çözeltisinde 37 °C'de 24 saat süre ile bekletildi. Bu süre bitiminde kürelerin üzerindeki yüzey suyu uzaklaştırılarak tartıldı.

Boş kürelerin denge şişme dereceleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulundu.

$$\text{Denge Şişme Derecesi (\%)} = \frac{\text{Şişmiş kürelerin kütlesi} - \text{kuru kürelerin kütlesi}}{\text{Kuru kürelerin kütlesi}} \times 100 \quad (2)$$

2.5 Fourier Transform İnfrared Spektrofotometresi (FTIR)

NaCMC, FBP, FBP yüklü NaCMC küre ve boş NaCMC kürelerin İnfrared Spektrası, KBr diskler kullanılarak Affinity-1 CE (Shimadzu, Japan) model FTIR spektrofotometresi kullanılarak 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu bölgesinde alındı.

2.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

FBP, FBP yüklü NaCMC küre ve boş NaCMC kürelerin DSC termogramları Shimadzu (Japan) model bir diferansiyel tarama kalorimetresi ile alınmıştır. Yaklaşık 3-4 mg numune, bir alüminyum panda nitrojen atmosferi altında 10 °C/dakikalık bir ısıtma hızında oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar ısıtıldı.

2.7 Küre Çapının Belirlenmesi

Her formülasyondan 10 tane FBP yüklü NaCMC kürenin çapı bir optik mikroskopla (Olympus CH20BIMF200, Japan) ölçüldü ve ölçüm sonuçları Çizelge 1'de gösterildi.

2.8 In Vitro FBP Salım Çalışması

FBP yüklü farklı formülasyonların in vitro ilaç salımı ilk 2 saat boyunca 100 mL pH 1.2 HCl çözeltisinde ve ardından 4 saat boyunca 100 mL pH 7.4 fosfat tampon çözeltisinde incelenmiştir. Kürelerinden FBP salımı, 100 rpm hızdaki çalkalamalı su banyosunda (Daihan WSB-18, Korea) 37 °C'de 100 mL salım çözeltilerinde incelendi. Salım çözeltilerinden 6 saat boyunca belirli zaman aralıklarında 2'şer mL numuneler alındı ve salım ortamına aynı miktarda taze salım çözeltisi eklendi. Salınan FBP miktarı, ultraviyole spektrofotometresi (Shimadzu UV-1700 Pharma) ile 247 nm'de analiz edildi.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Kürelerin Karakterizasyonu

NaCMC, FBP, FBP yüklü küre ve boş kürelerin FTIR spektrumu çapraz bağlanmanın oluşumunu ve ilacın stabilitesini kanıtlamak için alınmıştır (Şekil 2). NaCMC'un spektrumunda, 3000-3600 cm⁻¹'de gözlenen geniş bandın -OH gerilmesine, 2924 cm⁻¹'de gözlenen bandın alifatik C-H gerilme titreşimine, 1616 ve 1423 cm⁻¹'deki iki güçlü bandın ise asimetric ve simetric COO⁻ gruplarına ait olduğu düşünülmüştür (Akalin ve Pulat 2018). Boş kürenin spektrumunda ise, 1745 cm⁻¹'de gözlenen ilave pik, NaCMC'un karboksil grupları ile Zn²⁺ iyonları arasındaki elektro-statik etkileşimlerden kaynaklanmaktadır (Akalin and Pulat 2018, Bulut 2020 b). FBP'nin FTIR spektrumundaki karakteristik pikler, 1700 ve 1622 cm⁻¹'de -COOH grubunun C=O gerilmesi, 1323 cm⁻¹'de C-H metil gerilmesi ve 1219 cm⁻¹'de C-F gerilmesi olarak görüldü (Malipeddi *et al.* 2016, Bulut 2020 a) ilaveten, 3100-2600 cm⁻¹ civarında gözlenen pikler, alifatik ve aromatik -CH gerilmesine atfedilebilir. FBP'nin tüm karakteristik pikleri, FBP ile yüklenmiş kürelerin spektrumunda bulunur; bu, polimerler ve ilaç arasında hiçbir etkileşim olmadığını ve FBP'nin kürelere başarılı bir şekilde kapsüllendiğini doğrulamaktadır.

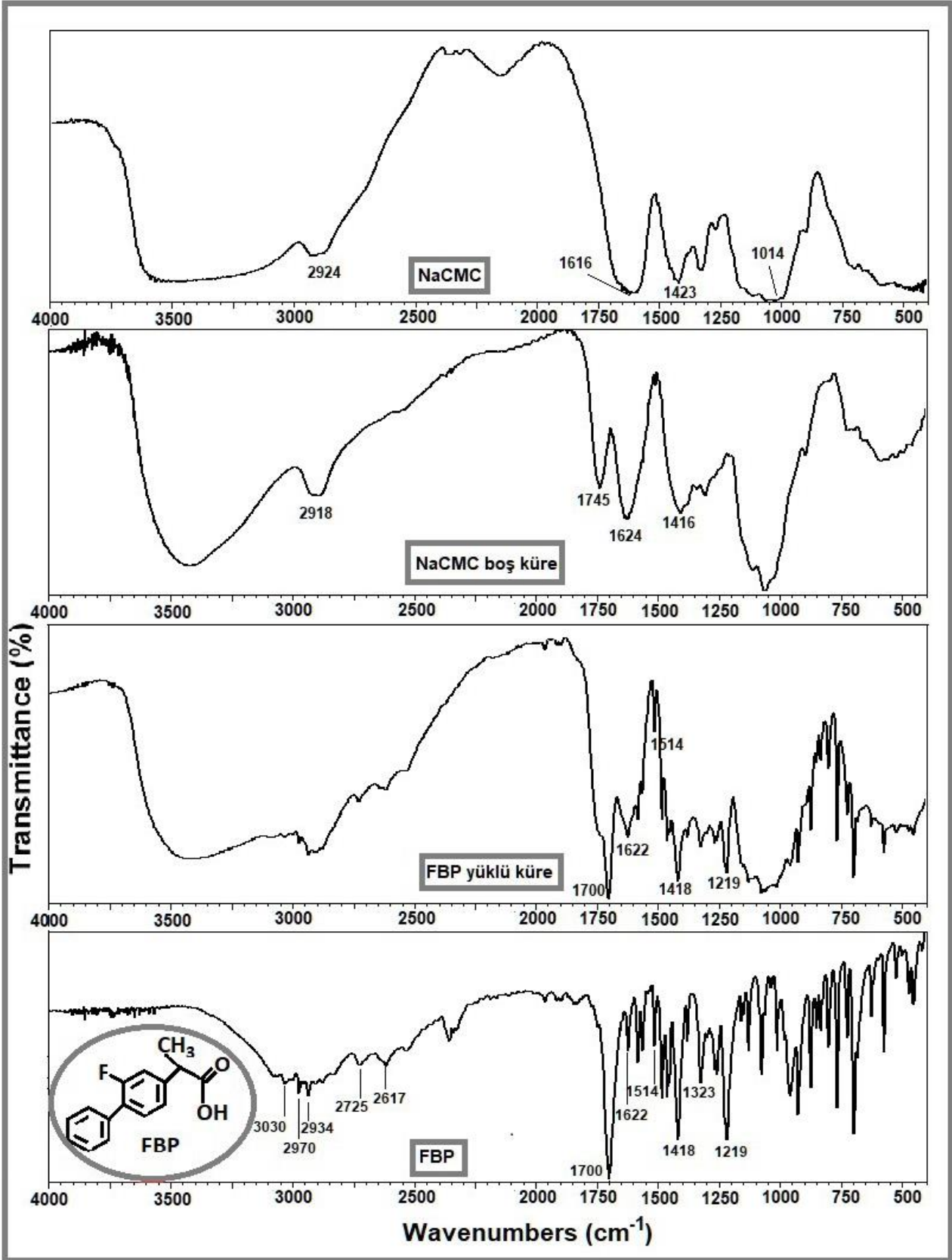
FBP, FBP yüklü küre ve boş kürenin DSC termogramları Şekil 3'de gösterilmektedir. FBP'nin termogramında 114 °C'de dar endotermik pik erime noktasına işaret etmektedir (Işıklan ve Erol 2020). FBP yüklü kürelerin termogramında, boş kürelerde

gözlemlenen tüm endotermik piklere ilaveten FBP'nin 114 °C'deki endotermik erime piki gözlemlendi, bu durum kürelerdeki ilacın polimer matriste kristal olarak dağıldığını gösterir.

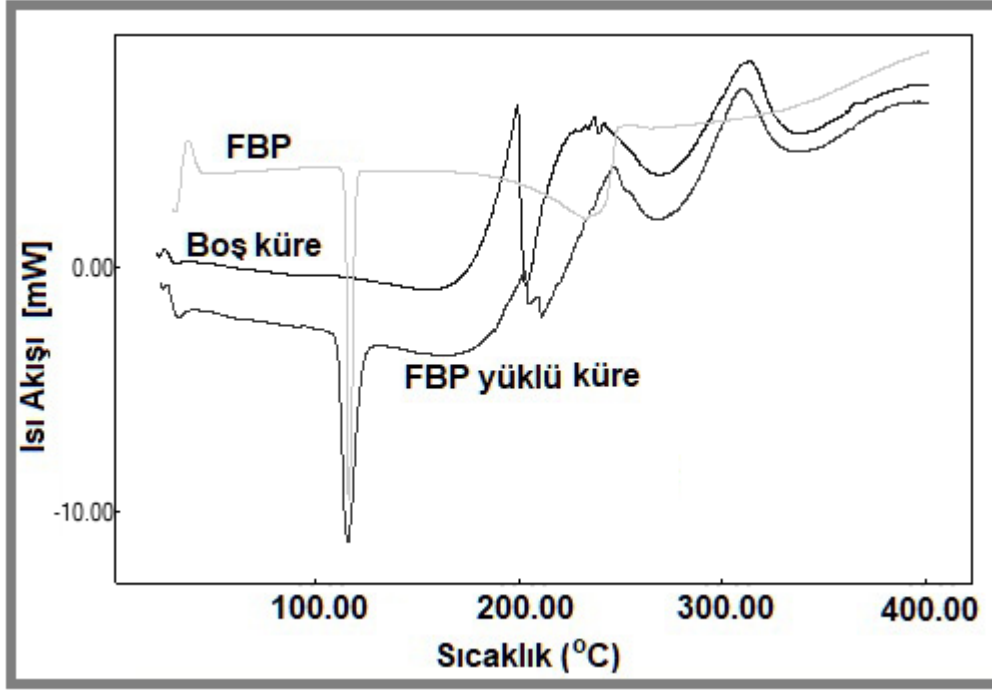
Şekil 4 incelendiğinde, % 2 ve % 3 NaCMC derişiminde hazırlanan kuru kürelerin yapılarının yassı ve yuvarlağa yakın görünümde olduğu dikkat çekti. % 4 NaCMC derişiminde hazırlanan kürelerin ise küre oluşumu sonrası ıslak hallerinin ve kurutulmuş hallerinin kuyruklu bir hal aldığı gözlemlendi. Bu durumun % 4 derişiminde çözeltinin diğer çözeltilere göre daha viskoz olmasına atfedilebilir. Elnashar ve arkadaşları (Elnashar *et al.* 2010) düşük molekül ağırlıklı ilaçların salımı için Ca²⁺ iyonları ile çapraz bağlı aljinat boncuk küreler hazırladı. Çalışmalarında, aljinat derişimini % 3'e çıkardıklarında, çözeltinin çok viskoz olmasından dolayı, boncukların hazırlanmasının zorlaştığını ve küresel olmayan (uzamış) tanecikler oluştuğunu bildirdiler.

Küreler, değişen polimer derişimine ve FBP yükleme yüzdesine bağlı olarak 2225.0±173.1µm ile 2472.1±209.4 µm arasında değişen çap dağılımına sahiptir (Çizelge 1). Çizelge 1 incelendiğinde, küre hazırlama çözeltisindeki polimer derişimi arttıkça, kürelerin çapı genel olarak azaldı. Diğer taraftan kürelere ilaç yüklemesi arttıkça polimer matriste ilaç içeriğinin artmasından dolayı küre çapları arttı. Bu durum polimer matristeki serbest hacimlerin ilaç molekülleri tarafından doldurmasından kaynaklanabilir (Bulut, 2020 b).

Kürelerin tutuklama verimliliği ve küre verimi, polimer matrisin tipine ve kürelerin hazırlama koşullarına bağlı olarak değişir. Çapraz bağlama süresi 10 dakika ve ZnCl₂ derişimi 0.1 M hazırlanma koşullarına sahip kürelerin NaCMC derişimi % 2'den % 4'e artırıldığında, tutuklama verimliliği (%) ve küre verimi (%) büyük oranda azaldı. Öte yandan, FBP yüklemesinin artırılması kürelerin tutuklama verimliliği ve küre veriminde bir artış sağladı.



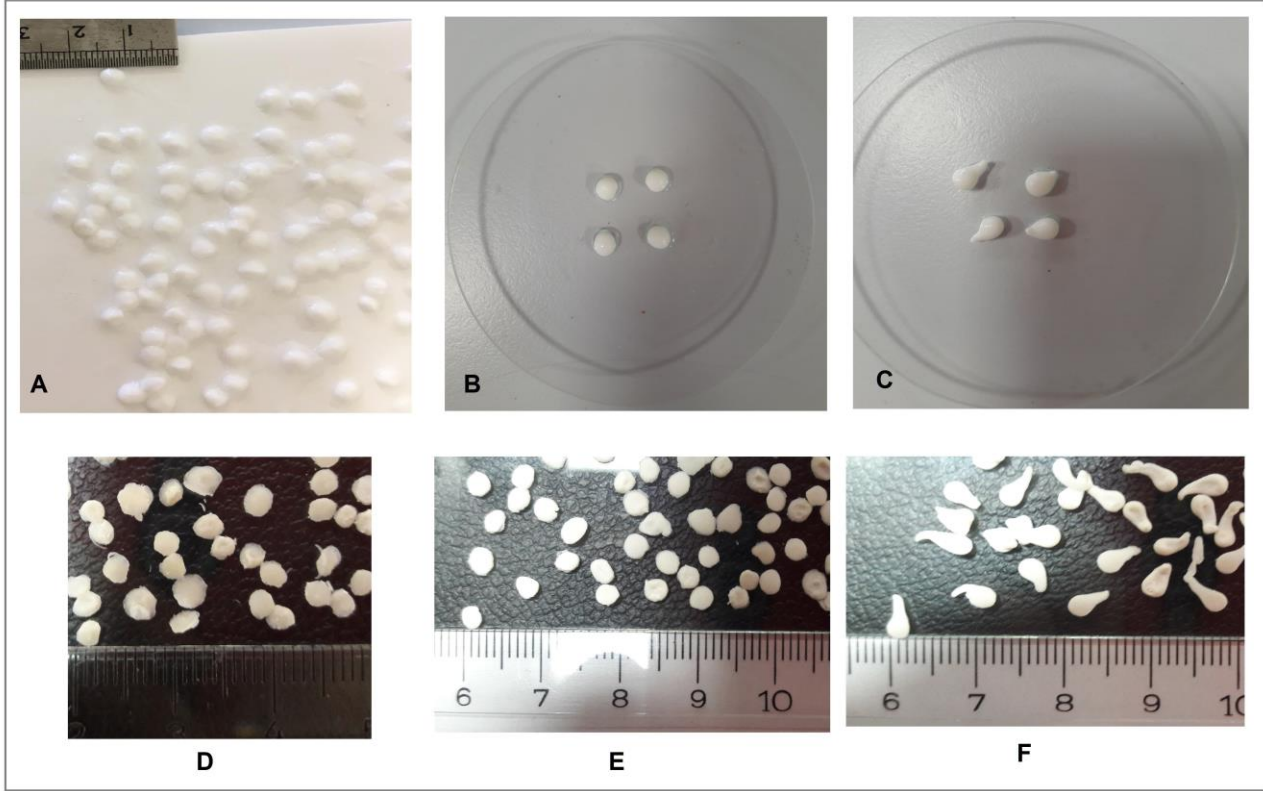
Şekil 2. NaCMC, NaCMC boş küre, FBP yüklü NaCMC küre ve FBP'nin FTIR sonuçları.



Şekil 3. FBP, NaCMC boş küre, FBP yüklü NaCMC kürelerin DSC termogramları.

Çizelge 1. Tüm küre formülasyonları için hazırlama koşulları, ortalama partikül boyutu (μm), tutuklama verimi (%) ve küre verimi (%) değerleri.

Kodu	NaCMC Derişimi (m/v, %)	ZnCl ₂ Derişimi (M)	Çapraz Bağlama Süresi (dakika)	FBP Yükleme (m/m, %)	Tutuklama Verimi (%)	Küre Verimi (%)	Ortalama Küre Çapı (μm)
A ₁	2	0.1	10	10	99.20	99.18	2249.3±270.6
A ₂	2	0.1	10	30	98.24	96.92	2428.1±178.7
A ₃	2	0.1	10	50	99.70	>100	2472.1±209.4
B ₁	3	0.1	10	10	81.99	91.28	2225.0±173.1
B ₂	3	0.1	10	30	84.35	94.66	2411.1±119.9
B ₃	3	0.1	10	50	95.55	92.27	2401.3±119.3
C ₁	4	0.1	10	10	62.75	77.92	2229.6±100.7
C ₂	4	0.1	10	30	67.95	75.80	2264.0±53.3
C ₃	4	0.1	10	50	68.80	71.96	2376.5±118.3



Şekil 4. (A) ve (D) % 2 NaCMC derişiminden hazırlanmış ıslak ve kuru küreler, (B) ve (E) % 3 NaCMC derişiminden hazırlanmış ıslak ve kuru küreler, (C) ve (F) % 4 NaCMC derişiminden hazırlanmış ıslak ve kuru kürelerin fotoğrafları.

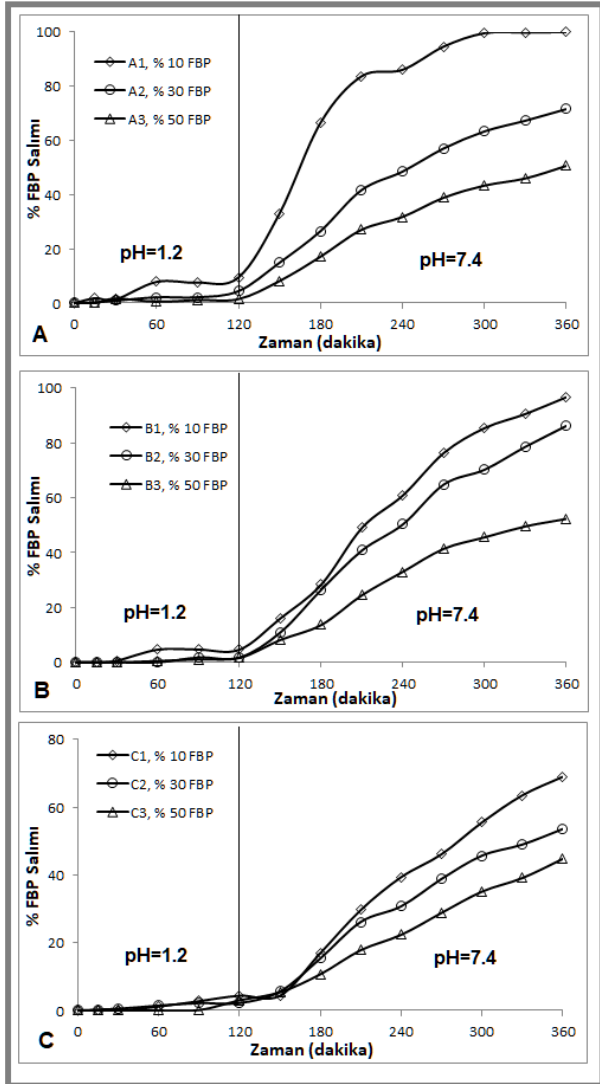
3.2 In Vitro İlaç Salımını Etkileyen Parametreler ve Şişme Çalışmaları

Kürelerden FBP'nin *in vitro* salım çalışmaları, ilk 2 saat boyunca pH 1.2 HCl çözeltisinde, ardından 4 saat boyunca pH 7.4 fosfat tampon çözeltisinde gerçekleştirildi. Şekil 5, farklı NaCMC derişimindeki kürelere ilaç yüklemesinin kümülatif FBP salımına olan etkilerini göstermektedir. Şekillerde görüldüğü üzere, kürelere ilaç yüklemesi arttıkça FBP salımı azalmıştır. Polimer matriste düşük miktarda ilaç molekülü bulunduğunda ilaç salımının daha yüksek olduğu açıktır. Daha düşük ilaç miktarı, Çizelge 1'de görüldüğü gibi daha küçük küre boyutuna neden olmuştur. Bu durum, kürelerin yüzey alanını artırır, bu nedenle, yüzeyden suyun girişi ve FBP'nin kürelerden difüzyonu artabilir. Kubar et al. (2003) da benzer sonuçlar bulmuştur.

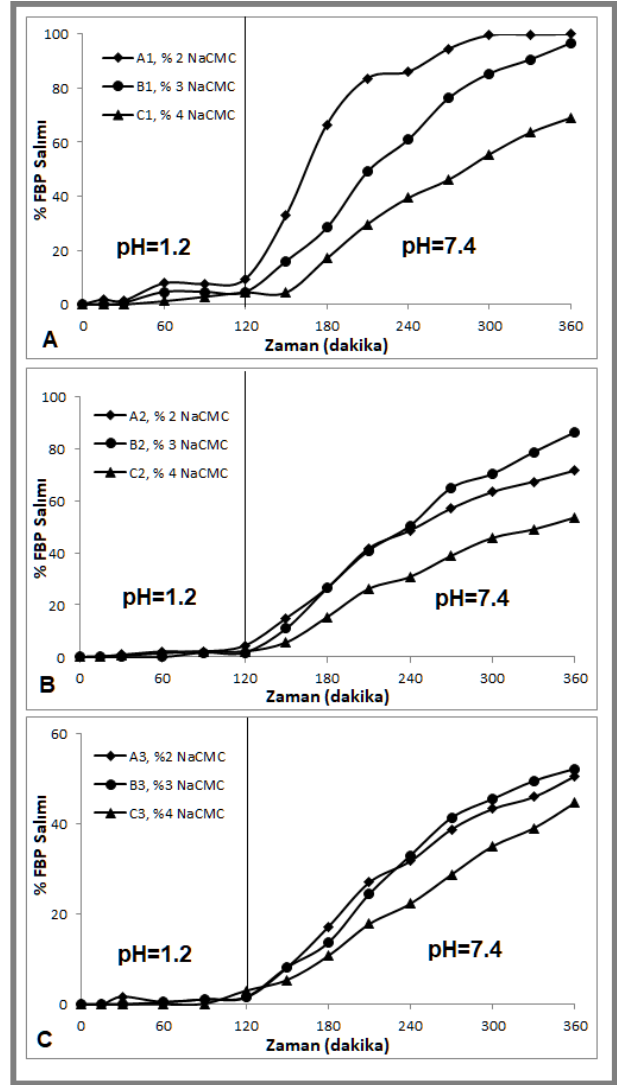
Salımı etkileyen diğer bir etkense NaCMC derişimidir. Şekil 6, farklı ilaç yüklemeleri üzerine FBP salımının etkisini gösterir. Grafiklerden, NaCMC derişiminin artmasıyla salım oranlarının %2>%3>%4 şeklinde olduğu görülmektedir. Derişim arttıkça viskozite artmakta ve ayrıca Zn²⁺ iyonları için de daha fazla COO⁻ grubu bulundurması sebebiyle çapraz bağlanma artmaktadır. Çapraz bağlanmanın artmasıyla daha küçük gözenek boyutuna sahip daha stabil ve kompakt bir jel membranın oluşumu çözünme ortamının kürelere nüfuzunu geciktirir ve salım hızı azalır (Elnashar *et al.* 2010). Çizelge 2'de verilen denge şişme sonuçları da FBP salım sonuçlarını desteklemektedir. NaCMC derişimi % 2'ten % 4'e yükseltildiğinde, pH 1.2 HCl çözeltisinde şişme derecesi % 113.3'den % 89.5'e düşerken, pH 7.4 fosfat tamponunda % 381.8'den % 277.8'e düştü.

pH, kontrollü ilaç salım sistemi için anahtar bir parametredir. Salım grafiklerinin tümü incelendiğinde, pH 1,2 'de ilacın çok azının salındığı, pH'nın artmasıyla FBP salımının arttığı görüldü. pH 7,4'teki daha yüksek salım, Çizelge 2'de görüldüğü

üzere kürelerin daha yüksek şişme derecesine bağlanır. pH'ın kürelerin şişme davranışına etkisini incelemek için pH 1.2 ve 7.4 ortamlarında şişme deneyleri yapıldı ve pH 7.4'teki kürelerin şişme derecesinin pH 1.2'den daha yüksek olduğu bulundu. Bu eğilim, polimer matristeki COO⁻ gruplarının asidik ortamda protonlanmış formda olmasına ve pH arttıkça deprotonasyon artmasına atfedilebilir. Bu kürelerin sonuçta, bağırsakta salım yapan küreler olduğu ve flurbiprofenin sebep olacağı mide irritasyonu gibi yan etkileri azaltacağı açıktır.



Şekil 5. % 2 (A), % 3 (B) ve % 4 (C) derişiminde NaCMC küreler için ilaç yüklemesinin FBP salımına etkisi. (Zn²⁺ derişimi 0.1 M, çapraz bağlama süresi 10 dakika)



Şekil 6. % 10 (A), % 30 (B) ve % 50 (C) ilaç yüklemesi için NaCMC derişiminin FBP salımına etkisi. (Zn²⁺ derişimi 0.1 M, çapraz bağlama süresi 10 dakika)

Çizelge 2. Zn²⁺ iyonları ile çapraz bağlı boş NaCMC kürelerin denge şişme derecesi (Zn²⁺ derişimi:0.1 M, çapraz bağlama süresi 10 dakika)

Kod	NaCMC (m/v, %)	Denge Şişme Derecesi (%) (pH 1.2)	Denge Şişme Derecesi (%) (pH 7.4)
A	2	113.3±11.1	381.8±4.4
B	3	92.8±7.4	322.9±6.7
C	4	89.5±4.0	277.8±2.9

3.3 İlaç Salım Kinetikleri

Kürelerdeki ilacın moleküler taşıma mekanizmasını anlamak için, kümülatif salım profilleri Peppas modeline uygulandı (Peppas 1985) ve ilaç salım verileri, $0 \leq M_t/M_\infty \leq 0.60$ için zamanın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitliğe göre bulunmuştur.

$$\left(\frac{M_t}{M_\infty}\right) = kt^n \quad (3)$$

Eşitlikte, M_∞ , denge zamanında salınan FBP miktarı, M_t , t zamanında salınan FBP miktarıdır ve n değeri FBP salım mekanizmasını karakterize eden sabit; ve k, FBP-polimer sisteminin karakteristik etkileşim parametresidir. Eşitlikten bulunan k, n ve r değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Küresel parçacıklar için, n=0.43 değeri için Fick difüzyonu hakimken, n = 0.85, Durum II taşıma (Sıfıncı derece) ilaç salım mekanizmasına hakimdir. n değeri 0.43 ile 0.85 arasında ise, anormal veya Fickian olmayan ilaç salım mekanizmasını gösterir (Ritger and Peppas 1987). Çalışmada, n değeri 0.8415 ile 1.3361 arasında değişmiştir, kürelerden FBP salımı esas olarak sadece polimerik gevşemenin gerçekleştiği Durum II taşımayı takip etmiştir.

Çizelge 3. Eşitlik 3'ten hesaplanan k, n ve r değerleri.

Kod	$k \times 10^3$ (dak^{-n})	n	r	Difüzyon Mekanizması
A ₁	18.04	0.8631	0.9909	Durum II
A ₂	8.39	0.8415	0.9961	Fick'e Uymayan
A ₃	4.71	0.8701	0.9907	Durum II
B ₁	5.39	0.9888	0.9943	Durum II
B ₂	2.77	1.0956	0.9961	Durum II
B ₃	3.20	0.9500	0.9912	Durum II
C ₁	0.59	1.3361	0.9821	Durum II
C ₂	1.79	1.0640	0.9867	Durum II
C ₃	1.66	1.0260	0.9990	Durum II

4. Sonuç

Bu çalışmada, NaCMC küreleri, flurbiprofenin oral uygulaması için ZnCl₂ çapraz bağlayıcısı varlığında başarıyla hazırlandı. Elde edilen küreler FBP'nin mide ortamında salınmasını geciktirmede başarılı oldu. FTIR ve DSC sonuçları, FBP'nin polimerik matriste kimyasal stabilitesini koruduğunu gösterdi. Fotoğraf görüntüleri, kürelerin yassı yapıda yuvarlağa yakın görünümde olduğunu, ancak polimer derişimi arttıkça kürelerde viskozite artışından dolayı kuyruklanma olduğunu gösterdi. İlaç salım çalışmaları, polimer derişiminin artmasıyla kürelerden FBP salınımının azaldığını, ilaç yükleme miktarı azaldıkça salımın arttığını göstermiştir. Kürelerden, ilaç salım mekanizması Durum II olarak tanımlanmıştır. Tüm bu sonuçlar, kürelerden FBP'nin *in vitro* salım sonuçlarına ve kinetik performansına dayalı olarak, ilaç verme uygulamaları için umut verici bir potansiyel aday olarak kullanılabileceğini gösterir.

Yazar Katkısı

Çalışmanın tasarlanması, deneylerin yapılması, sonuçların yorumlanması, taslağın hazırlanması ve son halinin onaylanması yazar tarafından yapılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar yazının içeriğinden ve yazılmasından sorumludur.

Etik Kurallar

Yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Teşekkür

Yazar, destekleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP koordinasyon birimine ve flurbiprofeni sağladığı için Atabay Firmasına (Türkiye) teşekkür eder.

5. Kaynaklar

- Akalın, G.O. and Pulat, M., 2018. Preparation and Characterization of Nanoporous Sodium Carboxymethyl Cellulose Hydrogel Beads. *Hindawi Journal of Nanomaterials*, **2018**, 1-12.
- Bulut, E., 2020 a. Flurbiprofen-Loaded Interpenetrating Polymer Network Beads Based on Alginate, Polyvinyl Alcohol and Methylcellulose: Design, Characterization and In-Vitro Evaluation. *Journal of Biomaterials Science-Polymer Edition*, **31(13)**, 1671–1688.
- Bulut, E., 2020 b. Chitosan Coated- and Uncoated-Microspheres of Sodium Carboxymethyl Cellulose/Polyvinyl Alcohol Crosslinked with Ferric Ion: Flurbiprofen Loading and In vitro Drug Release Study. *Journal of Macromolecular Science Part A-Pure and Applied Chemistry*, **57(1)**, 72–82.
- Bulut, E., 2021. Development and Optimization of Fe³⁺-Crosslinked Sodium Alginate-Methylcellulose Semi-interpenetrating Polymer Network Beads for Controlled Release of Ibuprofen. *International Journal of Biological Macromolecules*, **168**, 823–833.
- Bulut, E. and Şanlı, O., 2016. Novel Ionically Crosslinked Acrylamide-grafted Poly(vinyl alcohol)/Sodium Alginate/Sodium Carboxymethyl Cellulose pH-Sensitive Microspheres for Delivery of Alzheimer's Drug Donepezil Hydrochloride: Preparation and Optimization of Release Conditions. *Artificial Cells Nanomedicine and Biotechnology*, **44(2)**, 431–442.
- Cryer, B. and Feldman, M., 1998. Cyclooxygenase-1 and Cyclooxygenase-2 Selectivity of Widely Used Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs. *The American Journal of Medicine*, **104(5)**, 413–421.
- Elnashar, M.M., Yassin, M.A., Moneim, A.E.-F.A. and Bary, E.M.A., 2010. Surprising Performance of Alginate Beads for the Release of Low-Molecular-Weight Drugs. *Journal of Applied Polymer Science*, **116**, 3021–3026.
- Işıkhan, N. and Erol, Ü.H., 2020. Design and Evaluation of Temperature-Responsive Chitosan/ Hydroxypropyl Cellulose Blend Nanospheres for Sustainable Flurbiprofen Release. *International Journal of Biological Macromolecules*, **159**, 751–762.
- Kim, M.S., Park, S.J., Gu, B.K. and Kim, C.-H., 2012. Ionically Crosslinked Alginate-Carboxymethyl Cellulose Beads for the Delivery of Protein Therapeutics. *Applied Surface Science*, **262**, 28–33.
- Kumbar, S.G., Soppimath, K.S. and Aminabhavi, T.M., 2003. Synthesis and Characterization of Polyacrylamide-Grafted Chitosan Hydrogel Microspheres for the Controlled Release of Indomethacin. *Journal of Applied Polymer Science*, **87**, 1525–1536.
- Li, J., Lu, J. and Li, Y., 2009. Carboxymethylcellulose/Bentonite Composite Gels: Water Sorption Behavior and Controlled Release of Herbicide. *Journal of Applied Polymer Science*, **112**, 261–268.
- Malipeddi, V.R., Dua, K. and Awasthi, R., 2016. Development and Characterization of Solid Dispersion-Microsphere Controlled Release System for Poorly Water-Soluble Drug. *Drug Delivery and Translational Research*, **6**, 540–550.
- Mallikarjuna, B., Madhusudana Rao, K, Sudhakar, P., Chowdoji Rao, K. and Subha, M.C.S., 2013. Chitosan Based Biodegradable Hydrogel Microspheres for Controlled Release of an Anti HIV Drug. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, **1(3)**, 144-151.
- Peppas, N.A., 1985. Analysis of Fickian and Non-Fickian Drug Release from Polymer. *Pharmaceutica Acta Helveticae*, **60**, 110–111.
- Pourjavadi, A., Barzegar, Sh. and Mahdavinia, G.R., 2006. MBA-Crosslinked Na-Alg/CMC as a Smart Full-Polysaccharide Superabsorbent Hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, **66**, 386–395.
- Ramesh Babu, V., Rajinee Kanth, V., Mukund, J.M. and Aminabhavi, T.M., 2010. Novel Methyl Cellulose-Grafted-Acrylamide/Gelatin Microspheres for Controlled Release of Nifedipine. *Journal of Applied Polymer Science*, **115**, 3542–3549.
- Raut, N.S., Deshmukh, P.R., Umekar, M.J. and Kotagale, N.R., 2013. Zinc Cross-linked Hydroxamated Alginates for Pulsed Drug Release. *International Journal of Pharmaceutical Investigation*, **3(4)**, 194-202.

Ritger, P.L. and Peppas, N.A., 1987. A Simple Equation for Description of Solute Release II. Fickian and Anomalous Release from Swellable Devices. *Journal of Controlled Release*, **5**, 37–42.

Taha, M.O., Nasser, W., Ardakani, A. and AlKhatib, H.S., 2008. Sodium Lauryl Sulfate Impedes Drug Release from Zinc-Crosslinked Alginate Beads: Switching from Enteric Coating Release into Biphasic Profiles. *International Journal of Pharmaceutics*, **350**, 291–300.

Wang, Q., Wang, W., Wu, J. and Wang, A., 2012. Effect of Attapulgitic Contents on Release Behaviors of a pH Sensitive Carboxymethyl Cellulose-g-poly(acrylic acid)/Attapulgitic/Sodium Alginate Composite Hydrogel Bead Containing Diclofenac. *Journal of Applied Polymer Science*, **124**, 4424–4432.

$A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ Uzayı Üzerinde Öteleme Operatörünü İçeren Fonksiyonların Sürekliliği ÜzerineNilay DEĞİRMEN^{1*}, İbrahim DEĞİRMEN²¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Samsun.² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı, Samsun.Sorumlu Yazar e-posta: ¹nilay.sager@omu.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8192-8473>²ibrahimdgrmn01@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5669-1881>

Geliş Tarihi: 29.01.2021

Kabul Tarihi: 10.05.2021

Öz

G ünimodüler yerel kompakt grup ve $p = \min\{p_1, p_2\}$ olmak üzere $w \in B_p$ olsun. Bu makalede, ilk olarak, $W \in \Delta_2(G)$ şartını sağlayan ve $L^1(G)$ uzayına ait olan ya da olmayan her w ağırlığı için $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayında $\|\cdot\|$ normuna göre her yerde yoğun olan bir küme bulunabildiği ve bu kümelerdeki herhangi bir h elemanı için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonunun sürekli olduğu ispatlanmıştır. Burada, G üzerinde tanımlı basit fonksiyonların kümesi ve bu kümenin sonlu ölçümlü bir kümede desteğe sahip bir alt kümesi kullanılır. Ayrıca bu iki sonuç yardımıyla her $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ ve G grubundan $\mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ kümesine tanımlı $s \rightarrow \|L_s h\|$ fonksiyonlarının sürekli olduğu elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Yoğunluk;
Süreklilik;
Ağırlıklı Lorentz uzayı;
Girişim operatörü;
Tensör çarpımı

On Continuity of Functions Involving the Translation Operator on the Space $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$

Abstract

Let G be a unimodular locally compact group and $w \in B_p$ where $p = \min\{p_1, p_2\}$. In this paper, it has been proved that for every weight w that satisfies the condition $W \in \Delta_2(G)$ and belongs to the space $L^1(G)$ or not, there can be a dense set everywhere in the space $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ with respect to the norm $\|\cdot\|$ and for any element h in these sets the function $s \rightarrow L_s h$ from the group G to the space $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ is continuous. Here, the set of simple functions in G and a subset of this set with support in a set of finite measure is used. Also, by using these two results, it has been obtained that for any $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ the mapping $s \rightarrow L_s h$ from G to $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ and the mapping $s \rightarrow \|L_s h\|$ from G to $\mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ are continuous.

Keywords

Density;
Continuity;
Weighted Lorentz space;
Convolution operator;
Tensor product

1. Giriş

Avcı ve Gürkanlı (2007), Yap (1969) tarafından tanımlanan Lorentz uzaylarını kullanarak G yerel kompakt Abel grup, $1 < p_1, p_2 < \infty$ ve $1 \leq q_1, q_2 \leq \infty$ olmak üzere bir $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G)$ uzayı ve bu uzay üzerinde bir norm tanımlamıştır. Ayrıca yine Avcı ve Gürkanlı (2007) aynı çalışmada, $L(p, q)(G)$ Lorentz uzayında yoğun olan bir küme kullanılarak elde edilen ve $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G)$ uzayında yoğun olan bir kümenin bulunabileceğini ifade etmiş ve bu kümedeki herhangi bir h elemanı için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonunun sürekli olduğunu göstermiştir.

Li ve Sun (2012), Carro vd. (2007) tarafından tanımlanan ağırlıklı Lorentz uzaylarını ele alarak G ünimodüler yerel kompakt grup, $0 < p < \infty$, $0 < q < \infty$ ve $W \in \Delta_2(G)$ olmak üzere $L^1(G)$ uzayına ait olan ya da olmayan her w ağırlığı için $\Lambda_G^{p, q}(w)$ ağırlıklı Lorentz uzayında yoğun olan kümelerin varlığını ispatlamış ve bunun sonucunda da her $f \in \Lambda_G^{p, q}(w)$ için G grubundan $\Lambda_G^{p, q}(w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow f_s$ fonksiyonunun sürekli olduğunu elde etmiştir. Li ve Sun (2012) aynı çalışmada, ağırlıklı Lorentz uzaylarını kullanarak G ünimodüler yerel kompakt grup olmak üzere bazı özel w ağırlıkları için bir $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayı tanımlamış ve birkaç özelliğini incelemiştir. Ancak her yerde yoğun kümenin varlığı ve süreklilik problemlerini incelememiştir.

Buradan yola çıkarak, bu çalışmada, Avcı ve Gürkanlı (2007) nin kullandığı yöntemlerle G ünimodüler yerel kompakt grup, $p = \min\{p_1, p_2\}$ ve $w \in B_p$ olmak üzere Li ve Sun (2012) tarafından tanımlanan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayının yukarıda bahsedilen yoğunluk ve süreklilik problemlerinin ele alınması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Tanım 2.1 X, Y ve Z aynı F cismi üzerinde üç normlu lineer uzay olsun. Bir $\phi: X \times Y \rightarrow Z$ dönüşümü verilsin. Eğer aşağıdaki özellikler sağlarsa ϕ dönüşümüne bilineer dönüşüm denir.

i) Her $y \in Y$ için $x \rightarrow \phi(x, y)$ dönüşümü lineerdir.

ii) Her $x \in X$ için $y \rightarrow \phi(x, y)$ dönüşümü lineerdir.

Eğer her $x \in X$ ve her $y \in Y$ için $\|\phi(x, y)\| \leq M \|x\| \|y\|$ olacak şekilde pozitif bir M sayısı varsa ϕ bilineer dönüşümüne sınırlıdır denir. ϕ dönüşümünün normu;

$$\|\phi\| = \sup \{ \|\phi(x, y)\| : \|x\| \leq 1, \|y\| \leq 1 \}$$

ile tanımlanır (Bonsall and Duncan 1973).

Tanım 2.2 X ve Y, F cismi üzerinde iki normlu uzay, X' ve Y' de sırasıyla X ve Y nin dual uzayları olsun. $X' \times Y'$ uzayından F cisminde tanımlı bütün sınırlı, bilineer dönüşümlerin Banach uzayını $BL(X', Y'; F)$ ile gösterelim. Herhangi bir $x \in X$ ve $y \in Y$ verilsin. $x \otimes y$, $BL(X', Y'; F)$ nin $f \in X'$ ve $g \in Y'$ olmak üzere $(x \otimes y)(f, g) = f(x).g(y)$ ile tanımlı elemanı olsun. $\{x \otimes y : x \in X, y \in Y\}$ kümesinin $BL(X', Y'; F)$ uzayında gerdiği uzaya X ve Y nin cebirsel tensör çarpımı denir ve $X \otimes Y$ ile gösterilir (Bonsall and Duncan 1973).

Teorem 2.3 Bir $\phi: X \times Y \rightarrow Z$ bilineer dönüşümü verildiğinde her $x \in X$ ve her $y \in Y$ için $\sigma(x \otimes y) = \phi(x, y)$ olacak şekilde bir tek $\sigma: X \otimes Y \rightarrow Z$ lineer dönüşümü vardır (Bonsall and Duncan 1973).

Tanım 2.4 X ve Y iki normlu uzay olsun. $X \otimes Y$ cebirsel tensör çarpımı üzerinde γ projektif tensör normu; $\gamma(u) = \inf \left\{ \sum_i \|x_i\| \|y_i\| : u = \sum_i (x_i \otimes y_i) \right\}$

ile tanımlanır. Burada infimum u nun tüm sonlu gösterimleri üzerinden alınır. $X \otimes Y$ uzayının γ normuna göre tamlamasına X ve Y uzaylarının projektif tensör çarpımı denir ve $X \otimes_\gamma Y$ ile gösterilir. Projektif tensör çarpım uzayının her u

elemanı $\sum_{i=1}^{\infty} \|x_i\| \|y_i\| < \infty$ olmak üzere

$u = \sum_{i=1}^{\infty} (x_i \otimes y_i)$ şeklindedir (Bonsall and Duncan 1973).

Tanım 2.5 $(X, \mu), (\bar{X}, \bar{\mu})$ ve (Y, \mathcal{G}) üç ölçüm uzayı olsun. Bir T operatörü X ve \bar{X} üzerinde tanımlı basit fonksiyon çiftlerini Y üzerinde tanımlı negatif olmayan ölçülebilir fonksiyonlara dönüştürsün. Eğer f, f_1, f_2 ve g, g_1, g_2 basit fonksiyonları için aşağıdaki koşullar sağlanırsa bu T operatörüne pozitif girişim operatörü denir (Yap 1969).

- i) $\|T(f, g)\|_1 \leq \|f\|_1 \|g\|_1$
- ii) $\|T(f, g)\|_{\infty} \leq \|f\|_1 \|g\|_{\infty}$
- iii) $\|T(f, g)\|_{\infty} \leq \|f\|_{\infty} \|g\|_1$
- iv) $T(f_1 + f_2, g) = T(f_1, g) + T(f_2, g)$
- v) $T(f, g_1 + g_2) = T(f, g_1) + T(f, g_2)$.

Tanım 2.6 (X, μ) bir ölçüm uzayı ve $\mathcal{M}(X, \mu)$, X üzerinde hemen hemen her yerde sonlu olan ölçülebilir fonksiyonların sınıfı olsun. $f \in \mathcal{M}(X, \mu), 0 < \lambda < \infty$ için

$$\mu_f(\lambda) = \mu(x \in X : |f(x)| > \lambda)$$

f fonksiyonunun dağılım (veya distribüsyon) fonksiyonu olmak üzere $0 < t < \infty$ için

$$f^*(t) = \inf \{ \lambda : \mu_f(\lambda) \leq t \} = \sup \{ \lambda : \mu_f(\lambda) > t \}$$

eşitliği ile tanımlı f^* fonksiyonuna f fonksiyonunun rearrangementi, $0 < t < \infty$ için

$$f^{**}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t f^*(s) ds$$

ile tanımlı f^{**} fonksiyonuna da f fonksiyonunun ortalama (averaj) fonksiyonu denir. μ_f, f^* ve f^{**} fonksiyonları pozitif tanımlı, artmayan, sağdan sürekli fonksiyonlardır.

$0 < p, q < \infty$ olduğunu kabul edelim. $L^{p,q}(X)$ Lorentz uzayı,

$$\|f\|_{L^{p,q}(X)} = \left(\int_0^{\infty} \left(t^{1/p} f^*(t) \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{1/q} < \infty$$

olacak şekildeki tüm $f \in \mathcal{M}(X, \mu)$ fonksiyonlarının sınıfı olarak tanımlanır. $0 < p \leq \infty$ için $L^{p,\infty}(X)$ uzayı ise,

$$\|f\|_{L^{p,\infty}(X)} = \sup_{t>0} t^{1/p} f^*(t) < \infty$$

olacak şekildeki tüm $f \in \mathcal{M}(X, \mu)$ fonksiyonlarının sınıfı olarak tanımlanır (Hunt 1966).

$L^{p,q}(X)$ Lorentz uzayı üzerinde

$$\|f\|_{L^{p,q}(X)}^* = \begin{cases} \left(\frac{q}{p} \int_0^{\infty} \left(t^{1/p} f^{**}(t) \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{1/q}, & 0 < p < \infty, 0 < q < \infty \\ \sup_{t>0} t^{1/p} f^{**}(t), & 0 < p \leq \infty, q = \infty \end{cases}$$

ile tanımlı $\|\cdot\|_{L^{p,q}(X)}^*$ fonksiyonu bir normdur. Ayrıca $L^1(X)$ ve $1 < p \leq \infty, 1 \leq q \leq \infty$ için $L^{p,q}(X)$ uzayı $\|\cdot\|_{L^{p,q}(X)}^*$ normuna göre bir Banach uzayıdır (Hunt 1966).

Üstelik $1 < p < \infty, 0 < q \leq \infty$ için $C(p, q)$, p ve q ya bağlı bir sabit olmak üzere $\|f\|_{L^{p,q}(X)} \leq \|f\|_{L^{p,q}(X)}^* \leq C(p, q) \|f\|_{L^{p,q}(X)}$ eşitsizliği gerçekleşir (Yap 1969).

Tanım 2.7 \mathbb{R}^+ üzerinde tanımlı negatif olmayan yerel integrallenebilir fonksiyona, yani hemen hemen her yerde $(0, \infty)$ da değerler alan fonksiyona \mathbb{R}^+ da bir ağırlık fonksiyonu denir ve w ile gösterilir (Carro et al. 2007).

$(X, \mu) = (\mathbb{R}^+, w(t)dt)$ alırsak; $0 \leq \lambda < \infty$ için

$$\begin{aligned} \mu_f(\lambda) &= \mu(x \in \mathbb{R}^+ : |f(x)| > \lambda) \\ &= w(x \in \mathbb{R}^+ : |f(x)| > \lambda) \\ &= \int_{\{x \in \mathbb{R}^+ : |f(x)| > \lambda\}} w(x) d\mu(x) \end{aligned}$$

ve $0 < t < \infty$ için $f^*(t) = \inf \{ \lambda : \mu_f(\lambda) \leq t \}$ olur. Böylece $L^{p,q}(X, \mu) = L^{p,q}(R^+, w(t) dt)$ uzayı elde edilir ve bu uzay $L^{p,q}(w)$ ile gösterilir. $0 < p, q < \infty$ veya $0 < p \leq \infty, q = \infty$ için $\Lambda_X^{p,q}(w)$ ağırlıklı Lorentz uzayı Carro vd. (2007) tarafından $\|f\|_{\Lambda_X^{p,q}(w)} = \|f^*\|_{L^{p,q}(w)}$ olmak üzere

$$\Lambda_X^{p,q}(w) = \left\{ f \in \mathcal{M}(X, \mu) : \|f\|_{\Lambda_X^{p,q}(w)} < \infty \right\}$$

ile tanımlanır. $p = q$ olması durumunda

$$\Lambda_X^{p,p}(w) = \left\{ f \in \mathcal{M}(X, \mu) : \|f\|_{\Lambda_X^{p,p}(w)} < \infty \right\}$$

uzayı elde edilir. Burada

$$\begin{aligned} \|f^*\|_{L^p(R^+, w)} &= \left[\int_{R^+} |f^*(t)|^p (w(t))^p dt \right]^{\frac{1}{p}} \\ &\neq \left[\int_X |f(x)|^p (w(x))^p dx \right]^{\frac{1}{p}} \\ &= \|f\|_{L^p(X, w)} \end{aligned}$$

olduğundan $\Lambda_X^{p,p}(w) \neq L^p(X, w)$ dir. $\Lambda_X^{p,p}(w)$ uzayı $\Lambda_X^p(w)$ ile gösterilir. $w = 1$ olması durumunda

$$\Lambda_X^{p,q}(1) = \left\{ f \in \mathcal{M}(X, \mu) : \|f\|_{\Lambda_X^{p,q}(1)} < \infty \right\} \quad \text{ve}$$

$\mu_{f^*} = \mu_f$ eşitliği kullanıldığında

$$\begin{aligned} \|f^*\|_{L^{p,q}(\square^+, 1)} &= \|f^*\|_{L^{p,q}(\square^+, \mu)} \\ &= \left(\int_0^\infty \left(t^{\frac{1}{p}} (f^*)^*(t) \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q}} \\ &= \left(\int_0^\infty \left(t^{\frac{1}{p}} f^*(t) \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q}} \\ &= \|f\|_{L^{p,q}(X)} \end{aligned}$$

olduğundan $\Lambda_X^{p,q}(1) = L^{p,q}(X)$ dir (Carro et al. 2007).

$\Lambda_X^{p,q}(w)$ uzayının dualini ifade etmek için Lorentz uzaylarının başka bir çeşidi olan Γ tanımlanmıştır.

Tanım 2.8 A operatörü; $f \in \mathcal{M}^+(0, \infty)$ ve $t > 0$ olmak üzere $Af(t) = \frac{1}{t} \int_0^t f(s) ds$ ile tanımlı Hardy

operatörü olsun. $\Gamma_X^p(w)$ uzayı $0 < p < \infty$ için

$$\|f\|_{\Gamma_X^p(w)} = \left(\int_0^\infty (f^{**}(t))^p w(t) dt \right)^{\frac{1}{p}} \text{ olmak üzere}$$

$$\Gamma_X^p(w) = \left\{ f \in \mathcal{M}(X, \mu) : \|f\|_{\Gamma_X^p(w)} < \infty \right\}$$

ile ve $\Gamma_X^{p,q}(w)$ uzayı $0 < p, q < \infty$ için

$$W(t) = \int_0^t w(s) ds \text{ olmak üzere}$$

$$\Gamma_X^{p,q}(w) = \Gamma_X^q \left(W^{\frac{q-1}{p}} w \right)$$

ile tanımlanır. Burada

$$\begin{aligned} \|f\|_{\Gamma_X^{p,q}(w)} &= \|f\|_{\Gamma_X^q \left(W^{\frac{q-1}{p}} w \right)} \\ &= \left(\int_0^\infty (f^{**}(t))^q W^{\frac{q-1}{p}}(t) w(t) dt \right)^{\frac{1}{q}} \end{aligned}$$

dur (Carro et al. 2007).

Tanım 2.9 $0 < p < \infty$, L_{dec}^p ; L^p de negatif olmayan artmayan fonksiyonların sınıfı olmak üzere $A : L_{dec}^p(w) \rightarrow L^p(w)$ Hardy operatörü sınırlı ise $w \in B_p$ ile gösterilir (Carro et al. 2007).

Arino ve Muckenhoupt (1990) $1 \leq p < \infty$ olmak üzere $w \in B_p$ olması için gerekli ve yeterli şartın $\int_t^\infty \frac{w(x)}{x^p} dx \leq \frac{c}{t^p} \int_0^t w(x) dx$ eşitsizliğinin sağlanması olduğunu göstermiştir.

Örnek 2.10 $w(x) = x^{\frac{1}{3}}$ ile tanımlı w ağırlık fonksiyonu B_2 sınıfına aittir.

Tanım 2.11 $W(t) = \int_0^t w(s) ds$ olmak üzere

$\mu(A \cup B) > 0$ olan her ölçülebilir $A, B \subset X$ küme ikilisi için

$$0 < W(\mu(A \cup B)) \leq C(W(\mu(A)) + W(\mu(B)))$$

eşitsizliği sağlanırsa $W \in \Delta_2(X)$ yazılır. Buna denk koşul; her t için $W(2t) \leq K.W(t)$ eşitsizliğinin sağlanmasıdır (Carro et al. 2007).

Örnek 2.12 $p \geq 1$ olmak üzere $w(t) = p.t^{p-1}$ için $W(t) = t^p$ fonksiyonu $\Delta_2(X)$ sınıfına aittir.

Tanım 2.13 G bir yerel kompakt grup olmak üzere G üzerinde tanımlı ve aşağıdaki koşulları sağlayan pozitif, regüler μ Borel ölçümüne sol (sağ) Haar ölçümü denir.

- i) Her $E \subset G$ kompakt kümesi için $\mu(E) < \infty$ dir.
- ii) Her $E \subset G$ Borel kümesi ve her $x \in G$ için $\mu(xE) = \mu(E)$ ($\mu(Ex) = \mu(E)$) dir (Folland 1995).

Her yerel kompakt grup bir sol Haar ölçümüne sahiptir (Folland 1995).

Tanım 2.14 G bir yerel kompakt grup ve μ, G üzerinde tanımlı sol Haar ölçümü olsun. Eğer μ sol Haar ölçümü aynı zamanda sağ Haar ölçümü ise G grubuna ünimodüler grup denir (Folland 1995). G değişmeli, diskret veya kompakt bir grup ise ünimodülerdir (Folland 1995).

Tanım 2.15 (X, Σ, μ) bir ölçüm uzayı ve $A \in \Sigma$ olsun. Eğer aşağıdaki koşullar sağlanırsa A kümesine bir atom denir.

- i) $\mu(A) > 0$ dir.
- ii) $B \subset A$ olan herhangi bir $B \in \Sigma$ için $\mu(B) = 0$ veya $\mu(A) = \mu(B)$ dir.

Eğer pozitif ölçümlü her ölçülebilir küme bir atom içerirse μ ölçümüne atomik ölçüm, μ için Σ de hiçbir atom bulunamıyorsa μ ölçümüne atomik olmayan ölçüm denir. μ atomik bir ölçüm ise

(X, Σ, μ) ölçüm uzayına atomik ölçüm uzayı, μ atomik olmayan bir ölçüm ise (X, Σ, μ) ölçüm uzayına atomik olmayan ölçüm uzayı denir (Halmos 1974).

Örnek 2.16 μ sayma ölçümü olmak üzere $(N, \wp(N), \mu)$ ölçüm uzayı atomik ölçüm uzayı ve Σ Borel cebiri, η de Lebesgue ölçümü olmak üzere (R, Σ, η) ölçüm uzayı atomik olmayan ölçüm uzayıdır.

Tanım 2.17 (X, Σ, μ) bir ölçüm uzayı olmak üzere her $n \in N$ için $\mu(E_n) < \infty$ ve $X = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ olacak şekilde bir $(E_n) \subset \Sigma$ küme dizisi varsa (X, Σ, μ) uzayına σ -sonlu ölçüm uzayı denir (Halmos 1974).

Lemma 2.18, Lemma 2.19, Önerme 2.20, Lemma 2.21 da G bir yerel kompakt grup, λ, G nin bir sol Haar ölçümü ve $(G, \lambda), \sigma$ -sonlu atomik olmayan ölçüm uzayı olarak alınacaktır.

Lemma 2.18 G bir ünimodüler yerel kompakt grup, T bir girişim operatörü, $0 < p_1, p_2, q_1, q_2 < \infty$, $\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} > 1$, c bir sabit olmak üzere $w \geq c > 0$, $p = \min\{p_1, p_2\}$ olmak üzere $w \in B_p$ ve $f \in \Lambda^{p_1, q_1}(w)$, $g \in \Lambda^{p_2, q_2}(w)$ için $k = T(f, g) = f * g$ olsun. O halde $\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} = 1 + \frac{1}{r}$, $s \geq 1$ ve $\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} \geq \frac{1}{s}$ olmak üzere $k \in \Lambda^{r, s}(w)$ ve $\|k\|_{\Lambda^{r, s}(w)} \leq C \cdot \|f\|_{\Lambda^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda^{p_2, q_2}(w)}$ dir (Li and Sun 2012).

Lemma 2.19 $0 < p, q < \infty$ ve $W \in \Delta_2(G)$ olsun. O halde aşağıdaki ifadeler doğrudur.

- i) Eğer $w \in L^1(G)$ ise G deki basit fonksiyonlar kümesi S , $\Lambda_G^{p, q}(w)$ da yoğunudur.
- ii) Eğer $w \notin L^1(G)$ ise S nin sonlu ölçümlü bir kümede desteğe sahip olan S_0 alt

kümesi $\Lambda_G^{p, q}(w)$ da yoğundur (Li and Sun 2012).

Önerme 2.20 $0 < p, q < \infty$ olmak üzere her $f \in \Lambda_G^{p, q}(w)$ ve her $s \in G$ için $L_s f \in \Lambda_G^{p, q}(w)$, $R_s f \in \Lambda_G^{p, q}(w)$ dir. Dolayısıyla $\Lambda_G^{p, q}(w)$ uzayı ötelemeler altında invarianttir (Li and Sun 2012).

Lemma 2.21 $0 < p, q < \infty$ olmak üzere her $f \in \Lambda_G^{p, q}(w)$ için $G \rightarrow \Lambda_G^{p, q}(w), s \rightarrow L_s f$ dönüşümü süreklidir (Li and Sun 2012).

Bu kesimin devamında ve bulgular bölümünde G bir ünimodüler yerel kompakt grup, λ , G nin bir sol Haar ölçümü ve (G, λ) , σ -sonlu atomik olmayan ölçüm uzayı,

$$1 < p_1, p_2 < \infty, 1 \leq q_1, q_2 < \infty, \\ \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} > 1, \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} = 1 + \frac{1}{r}, r > 0, \\ \frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} \geq \frac{1}{s}, s \geq 1,$$

$c > 0$ olmak üzere $w \geq c > 0$, $p = \min\{p_1, p_2\}$ olmak üzere $w \in B_p$ olsun.

$\tilde{f}(x) = f(-x)$ olmak üzere her $\lambda \geq 0$ için $\mu_f(\lambda) = \mu_{\tilde{f}}(\lambda)$ olduğundan $\|f^*\|_{L^{p, q}(w)} = \|(\tilde{f})^*\|_{L^{p, q}(w)}$ ve dolayısıyla $\|f\|_{\Lambda_G^{p, q}(w)} = \|\tilde{f}\|_{\Lambda_G^{p, q}(w)}$ dir. Yani $f \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ iken $\tilde{f} \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ olur. Böylece Lemma 2.18 gereği her $f \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ için

$$\|T(\tilde{f}, g)\|_{\Lambda_G^{r, s}(w)} \leq C \cdot \|\tilde{f}\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \\ = C \cdot \|f\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}$$

eşitsizliği yazılır. O halde $\Lambda_G^{p_1, q_1}(w) \times \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ uzayından $\Lambda_G^{r, s}(w)$ uzayına bir k bilineer dönüşümünü $f \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ olmak üzere $k(f, g) = \tilde{f} * g$ şeklinde tanımlayabiliriz. Bu

k dönüşümü iyi tanımlıdır. Ayrıca $\|f\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \leq 1, \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \leq 1$ olan her $f \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ için

$$\|k\| = \sup \left\{ \frac{\|k(f, g)\|_{\Lambda_G^{r, s}(w)}}{\|f\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}} \right\} \\ = \sup \left\{ \frac{\|\tilde{f} * g\|_{\Lambda_G^{r, s}(w)}}{\|f\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}} \right\} \\ \leq \sup \left\{ \frac{C \cdot \|f\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}}{\|f\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}} \right\} = C$$

olduğundan k dönüşümü sınırlıdır. O halde Teorem 2.3 gereği bu sınırlı k bilineer dönüşümüne her $f \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ için $K(f \otimes g) = \tilde{f} * g$ olacak şekilde $\Lambda_G^{p_1, q_1}(w) \otimes_\gamma \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ uzayından $\Lambda_G^{r, s}(w)$ uzayına tanımlı bir tek K lineer dönüşümü karşılık gelir. Yine $\|K\| \leq C$ olup K dönüşümü de sınırlıdır (Li and Sun 2012).

Tanım 2.22 K lineer dönüşümü altında $\Lambda_G^{p_1, q_1}(w) \otimes_\gamma \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ uzayının görüntüsünü $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ ile gösterelim. Böylece

$$A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w) = \left\{ \begin{array}{l} h = \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{f}_i * g_i): \\ f_i \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g_i \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w), \\ K \left(\sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{f}_i \otimes g_i) \right) = \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{f}_i * g_i), \\ \sum_{i=1}^{\infty} (\|f_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}) < \infty \end{array} \right\}$$

olur. Her $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ için $f_i \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g_i \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ ve $h = \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{f}_i * g_i)$ olmak üzere

$$\|h\| = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \|f_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right\}$$

ile tanımlanan $\|\cdot\|$ fonksiyonu bir normdur. Böylece $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayı bir normlu uzay olur (Li and Sun 2012).

Sonuç 2.23 Her $s \in G$ ve her $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ için $\|L_s h\| \leq c \|h\|$ eşitsizliği vardır (Değirmen ve Değirmen 2021).

3. Bulgular

S, G de tanımlı basit fonksiyonların kümesi ve P, S nin sonlu ölçümlü bir kümede desteğe sahip bir alt kümesi olsun.

Önerme 3.1 $W \in \Delta_2(G)$ olsun. O halde aşağıdaki ifadeler doğrudur.

- i) Eğer $w \in L^1(G)$ ise $K(S \otimes_\gamma S)$ kümesi $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayında $\|\cdot\|$ normuna göre her yerde yoğundur.
- ii) Eğer $w \notin L^1(G)$ ise $K(P \otimes_\gamma P)$ kümesi $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayında $\|\cdot\|$ normuna göre her yerde yoğundur.

İspat:

i) Herhangi bir $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ alalım. Bu durumda $f_i \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g_i \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ olmak üzere

$$h = \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{f}_i * g_i), \sum_{i=1}^{\infty} \|f_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} < \infty$$

yazılır. $h_n = \sum_{i=1}^n (\tilde{f}_i * g_i)$ diyelim. $\sum_{i=1}^{\infty} \tilde{f}_i * g_i$ serisi

h fonksiyonuna yakınsadığından herhangi bir $\varepsilon > 0$ sayısı verildiğinde her $n \geq n_0$ olduğunda

$$\begin{aligned} \|h - h_n\| &= \left\| \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{f}_i * g_i) - \sum_{i=1}^n (\tilde{f}_i * g_i) \right\| \\ &= \left\| \sum_{i=n+1}^{\infty} (\tilde{f}_i * g_i) \right\| \\ &\leq c \sum_{i=n+1}^{\infty} \|f_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \\ &< \frac{\varepsilon}{3} \end{aligned}$$

olacak şekilde $n_0 \in \mathbb{N}$ vardır.

Şimdi n_0 sayısına eşit veya n_0 sayısından büyük olan bir v_0 doğal sayısı seçelim ve sabitleyelim.

$$c_1 = \max_{1 \leq i \leq v_0} \|g_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \text{ ve } c_2 = \max_{1 \leq i \leq v_0} \|s_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \text{ olsun.}$$

Lemma 2.19 i) gereği $\bar{S} = \Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ olduğundan verilen aynı $\varepsilon > 0$ sayısı ve her $i \in \mathbb{N}$ için

$$\|f_i - s_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} < \frac{\varepsilon}{3v_0 c_1 t_1}$$

ve

$$\|g_i - k_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} < \frac{\varepsilon}{3v_0 c_2 t_2}$$

olacak şekilde $s_i, k_i \in S$ vardır. Bu durumda

$$s_i \otimes k_i \in S \otimes_\gamma S \text{ olup } \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * k_i) \in K(S \otimes_\gamma S)$$

yazılır. Yine aynı $\varepsilon > 0$ için

$$\begin{aligned}
 & \left\| \left\| h - \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * k_i) \right\| \right\| \\
 &= \left\| \left\| h - h_{v_0} + h_{v_0} - \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * g_i) \right\| \right\| \\
 & \quad + \left\| \left\| \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * g_i) - \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * k_i) \right\| \right\| \\
 &\leq \left\| h - h_{v_0} \right\| + \left\| \left\| h_{v_0} - \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * g_i) \right\| \right\| \\
 & \quad + \left\| \left\| \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * g_i) - \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * k_i) \right\| \right\| \\
 &< \frac{\varepsilon}{3} + \left\| \left\| \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{f}_i * g_i) - \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * g_i) \right\| \right\| \\
 & \quad + \left\| \left\| \sum_{i=1}^{v_0} (\tilde{s}_i * (g_i - k_i)) \right\| \right\| \\
 &\leq \frac{\varepsilon}{3} + \left\| \left\| \sum_{i=1}^{v_0} ((\tilde{f}_i - \tilde{s}_i) * g_i) \right\| \right\| \\
 & \quad + \sum_{i=1}^{v_0} t_2 \left(\|s_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i - k_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right) \\
 &\leq \frac{\varepsilon}{3} + \sum_{i=1}^{v_0} t_1 \left(\|f_i - s_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right) \\
 & \quad + \sum_{i=1}^{v_0} t_2 \left(\|s_i\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_i - k_i\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right) \\
 &< \frac{\varepsilon}{3} + \sum_{i=1}^{v_0} t_1 \frac{\varepsilon}{3v_0 c_1 t_1} c_1 \\
 & \quad + \sum_{i=1}^{v_0} t_2 \frac{\varepsilon}{3v_0 c_2 t_2} c_2 = \varepsilon
 \end{aligned}$$

olur. O halde $K(S \otimes_\gamma S)$ kümesi $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayında $\|\cdot\|$ normuna göre her yerde yoğundur. Böylece ispat tamamlanır.

ii) i) şıkkının ispatında S yerine P alınarak ve Lemma 2.19 ii) kullanılarak ispat yapılır.

Önerme 3.2

i) Eğer $w \in L^1(G)$ ise her $h \in K(S \otimes_\gamma S)$ için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonu süreklidir.

ii) Eğer $w \notin L^1(G)$ ise her $h \in K(P \otimes_\gamma P)$ için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonu süreklidir.

İspat:

i) $s \rightarrow L_s h$ lineer olduğundan bu fonksiyonun G üzerindeki sürekliliğini göstermek için G grubunun biriminde sürekli olduğunu göstermek yeterlidir. Herhangi bir $h \in K(S \otimes_\gamma S)$ alalım. O halde Önerme 3.1 i) gereği $f_k \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w), g_k \in \Lambda_G^{p_2, q_2}(w)$ olmak üzere $h = \sum_{k=1}^{\infty} (\tilde{f}_k * g_k), \sum_{k=1}^{\infty} (\|f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}) < \infty$ yazılır. Buradan her $s \in G$ için

$$\begin{aligned}
 \|L_s h - L_e h\| &= \|L_s h - h\| \\
 &= \left\| L_s \sum_{k=1}^{\infty} (\tilde{f}_k * g_k) - \sum_{k=1}^{\infty} (\tilde{f}_k * g_k) \right\| \\
 &= \left\| \sum_{k=1}^{\infty} L_s (\tilde{f}_k * g_k) - \sum_{k=1}^{\infty} (\tilde{f}_k * g_k) \right\| \\
 &= \left\| \sum_{k=1}^{\infty} ((L_s \tilde{f}_k) * g_k) - \sum_{k=1}^{\infty} (\tilde{f}_k * g_k) \right\| \\
 &= \left\| \sum_{k=1}^{\infty} ((L_s \tilde{f}_k - \tilde{f}_k) * g_k) \right\| \\
 &= \left\| \sum_{k=1}^{\infty} (((R_s f_k)^\sim - \tilde{f}_k) * g_k) \right\| \\
 &= \left\| \sum_{k=1}^{\infty} ((R_s f_k - f_k)^\sim * g_k) \right\| \\
 &\leq c \sum_{k=1}^{\infty} (\|R_s f_k - f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)})
 \end{aligned}$$

elde edilir.

Önerme 2.20 den $\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ uzayının ötelemeler altında invariant olduğu ve Lemma 2.21 den $f \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ için G grubundan $\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ uzayına giden $s \rightarrow L_s f$ fonksiyonunun sürekliliği biliniyor. $\tilde{f}_k \in \Lambda_G^{p_1, q_1}(w)$ olduğundan $s \rightarrow 0$ için $\|L_s \tilde{f}_k - \tilde{f}_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \rightarrow 0$ dir.

$$\begin{aligned} \|L_s \tilde{f}_k - \tilde{f}_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} &= \|(R_s f_k)^\sim - \tilde{f}_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \\ &= \|R_s f_k - f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \end{aligned}$$

olduğundan $\|R_s f_k - f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \rightarrow 0$ olur. Yine

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\|R_s f_k - f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right) \\ \leq \sum_{k=1}^{\infty} \left(\|R_s f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} + \|f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \right) \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \\ = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left(\|f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right) < \infty \end{aligned}$$

elde edilir. Böylece

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left(\|R_s f_k - f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)} \right) \text{ toplamı sınırlı}$$

olur. Bu durumda

$$\|L_s h - h\| \leq c \sum_{k=1}^{\infty} \|R_s f_k - f_k\|_{\Lambda_G^{p_1, q_1}(w)} \|g_k\|_{\Lambda_G^{p_2, q_2}(w)}$$

eşitsizliğinde $s \rightarrow 0$ için limit alınırsa $\|L_s h - h\| \rightarrow 0$ elde edilir. Bu ise $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonunun G grubunun biriminde sürekli olması demektir. Buradan her $h \in K(S \otimes_{\gamma} S)$ için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonunun sürekli olduğu elde edilir.

ii) i) şıkkının ispatında S yerine P alınarak ve Önerme 3.1 ii) kullanılarak ispat yapılır.

Önerme 3.3 Her $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ için G grubundan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayına tanımlı $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonu süreklidir.

İspat: Herhangi bir $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ alalım.

$w \in L^1(G)$ olsun. Bu durumda $K(S \otimes_{\gamma} S)$ kümesi $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayında her yerde yoğundur. O halde herhangi bir $\varepsilon > 0$ verildiğinde $\|h - k\| < \frac{\varepsilon}{3}$ olacak şekilde $k \in K(S \otimes_{\gamma} S)$ vardır. Sonuç 2.23 kullanılırsa

$$\begin{aligned} \|L_s h - h\| &= \|L_s h - L_s k + L_s k - k + k - h\| \\ &\leq \|L_s h - L_s k\| + \|L_s k - k\| + \|k - h\| \\ &= \|L_s(h - k)\| + \|L_s k - k\| + \|k - h\| \\ &= \|k - h\| + \|L_s k - k\| + \|k - h\| \\ &= 2\|k - h\| + \|L_s k - k\| \\ &< \frac{2\varepsilon}{3} + \|L_s k - k\| \end{aligned}$$

yazılır. Diğer yandan Önerme 3.2 i) şıkkından dolayı $s \rightarrow L_s k$ fonksiyonu sürekli olduğundan aynı $\varepsilon > 0$

sayısı verildiğinde her $s \in U$ için $\|L_s k - k\| < \frac{\varepsilon}{3}$

olacak şekilde $U \in U(e)$ komşuluğu vardır. Bu durumda aynı $\varepsilon > 0$ sayısı ve her $s \in U$ için

$\|L_s h - h\| < \frac{2}{3}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon = \varepsilon$ elde edilir. Bu durumda

$s \rightarrow L_s h$ fonksiyonu süreklidir.

$w \notin L^1(G)$ olması durumunda ilk kısımda $K(S \otimes_{\gamma} S)$ yerine $K(P \otimes_{\gamma} P)$ alınarak ve Önerme 3.2 ii) kullanılarak devam edilir. Bu durumda $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonu süreklidir. Böylece ispat tamamlanır.

Sonuç 3.4 Her $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ için G grubundan $\mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ kümesine tanımlı $s \rightarrow \|L_s h\|$ fonksiyonu süreklidir.

İspat: Her $h \in A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ elemanı için $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonunun sürekli olduğunu Önerme 3.3 den biliyoruz. Bu durumda $s \rightarrow L_s h$ fonksiyonu herhangi bir $s_0 \in G$ noktasında sürekli olur. Böylece herhangi bir $\varepsilon > 0$ sayısı verildiğinde her $s \in U$ için $\|L_s h - L_{s_0} h\| < \varepsilon$ olacak şekilde $U \in U(s_0)$ komşuluğu vardır. Buradan aynı $\varepsilon > 0$ sayısı ve her $s \in U$ için $\|L_s h\| - \|L_{s_0} h\| \leq \|L_s h - L_{s_0} h\| < \varepsilon$ elde edilir. Dolayısıyla $s \rightarrow \|L_s h\|$ fonksiyonu süreklidir. Böylece ispat tamamlanır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu makalede, G ünimodüler yerel kompakt grup olmak üzere Li ve Sun (2012) tarafından tanımlanan $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayındaki Avcı ve Gürkanlı (2007) nin ele aldığı yöntemlerle yoğunluk ve süreklilik gibi temel özellikler incelenmiştir. Böylece $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayı ile $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G)$ ve $\Lambda_G^{p, q}(w)$ uzaylarındaki sonuçların benzerlik gösterdiği ve bu uzaylarda bu sonuçlara dayanan ve literatürde var olan bazı özelliklerin de $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayında araştırılabileceği saptanmıştır.

5. Kaynaklar

Arino, M. A. and Muckenhoupt, B., 1990. Maximal functions classical Lorentz spaces and Hardy' s inequality with weights for nonincreasing functions. *Transactions of the American Mathematical Society*, **320**(2), 727-735.

Avcı, H. and Gürkanlı, A. T., 2007. Multipliers and tensor products of $L(p, q)$ Lorentz spaces. *Acta Mathematica Scientia*, **27**(B)(1), 107-116.

Bonsall, F. F. and Duncan, J., 1973, Complete Normed Algebras, 80, Springer Verlag, Berlin, 230-237.

Carro, M. J., Raposo, J. A. and Soria, J., 2007, Recent Developments in the Theory of Lorentz Spaces and Weighted Inequalities, 187, no. 877, Managing editor Robert Guralnick, *Memoirs of the American Mathematical Society*.

Değirmen, N. ve Değirmen, İ., 2021. $A_{p_1, q_1}^{p_2, q_2}(G, w)$ uzayı ve bazı topolojik özellikleri üzerine. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **11**(2), 1468-1480.

Folland, G. B., 1995, A Course in Abstract Harmonic Analysis, CRS Press, Boca Raton, Florida, 36-47.

Halmos, P. R., 1974, Measure Theory, Second edition, Springer Verlag, New York, 73-183.

Hunt, R. 1966. On $L(p, q)$ spaces. *L'Enseignement Mathématique*, **12**, 249-276.

Li, H. and Sun, Q., 2012. Multipliers and tensor products of the weighted Lorentz spaces $\Lambda_G^{p, q}(w)$. *Georgian Mathematical Journal*, **19**, 721-740.

Yap, L. Y. H., 1969. Some remarks on convolution operators and $L(p, q)$ spaces. *Duke Mathematical Journal*, **36**, 647-658.

The Effect of Scoring Factor for Leiden Algorithm

Serkan GÜLDAL^{1*}¹Adiyaman University, Faculty of Arts and Sciences, Physics Department, Adiyaman, 02040, TurkeyCorresponding Author e-mail: sguldal@adiyaman.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4247-0786>

Geliş Tarihi: 29.01.2021

Kabul Tarihi: 10.05.2021

Abstract

Leiden algorithm is a widely utilized algorithm to cluster network graphs. It divides the specified network into smaller clusters. The clusters are relatively dense networks of vertices. In the process, the networks are divided based on quality factors. In this study, we compare the result of the Leiden algorithm with changing quality factors, namely Modularity and Constant Potts Model (CPM). For our analysis, we used 3×3 knight graph. Our investigation is completed for resolutions from 0.1 to 4.0 for Modularity and from 0.1 to 1.0 for CPM. The maximum quality scores are 0.9 and 0.59375 for Modularity and CPM respectively. The continuous decrease in the quality was recorded for both cases with respect to the increasing resolution. Both scoring factors are followed similar trends, but CPM has a relatively rapid division of the specified graph.

Keywords

Clustering;
Graph;
Leiden Algorithm;
N-KCP

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Leiden Algoritmasında Kalite Faktörünün Etkisi

Öz

Leiden algoritması, çizgeleri kümelemek için yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır ve belirtilen çizgeyi daha küçük kümelerle böler. Bu kümeler, nispeten yoğun düğüm çizgeleridir. Süreçte çizgeler kalite faktörlerine göre kümelendir. Bu çalışmada Leiden algoritmasını Modülerlik ve Sabit Potts Modeli (CPM) kalite faktörleri ile değişimini karşılaştırılmıştır. Analiz için 3×3 at çizgesi kullanıldı. İnceleme Modülerlik için 0,1'den 4,0'a ve CPM için 0,1'den 1,0'a kadar olan çözünürlükler için tamamlandı. Maksimum kalite puanları Modülerlik ve CPM için sırasıyla 0,9 ve 0,59375'tir. Kalitede artan çözünürlüğe göre her iki durumda da sürekli düşüş kaydedildi. Her iki puanlama faktörü de benzer eğilimler izlendi, ancak CPM nispeten konu edilen çizgeyi daha hızlı kümeledi.

Anahtar kelimeler

Kümeleme;
Çizge;
Leiden Algoritması;
N-AKP

1. Introduction

The Leiden algorithm is used to cluster the specified graph such as medical (Wang *et al.*, Clifford *et al.* 2019, Dong and Yuan 2020, Gibbs *et al.* 2020, Li *et al.* 2020), economics (Pasimeni 2020), and text analysis (Ahlgren *et al.* 2019, Boy 2020, Miura *et al.* 2020) subject. It is a well-known clustering algorithm which efficiently divides the whole network into smaller clusters of nodes. Each cluster presents a relation of included nodes in the same cluster. It is extensively utilized since it is considered computationally efficient (Traag *et al.* 2019). In this study, we used the Leiden algorithm combined with Modularity and Constant Potts Model (CPM) quality functions to cluster 3-KCP (Girvan and Newman 2002, Delvenne *et al.* 2013, van Laarhoven and Marchiori 2013, Van Laarhoven

and Marchiori 2014, Esmailian and Jalili 2015, Devi and Poovammal 2016). The subjected quality functions are used widely to measure the appropriateness of the clusters.

3-KCP graph is based on the knight moves on the 3×3 board (See Figure 1). The knights as chess pieces are extensively used to build a defense and orchestrate attacks because their moves are not emulated by the other pieces. Thus, knights are being subjected to the various problems based on the knights' movements on the chess-board-likes without any known analytical solutions. The well-known knight's tour problem is one of them. The knight's tour problem puzzled many mathematicians and computer scientists. Many algorithms are implemented and tested to obtain solutions (Parberry 1997, Hingston and Kendall 2004, Bai *et al.* 2006, Jian and Sen 2009, Bai *et al.*

2013). Moreover, further problems are introduced in the same extend (Kumar 2008, Demaio and Mathew 2011, Aliquippa and Pennsylvania 2020). The knight moves are also utilized for image encryption (Hou *et al.* 2004, Delei *et al.* 2008, Philip 2013, Kumar and Nirmala 2015, Singh *et al.* 2015). Additional moves of single knights on a chess-board-likes with the legal chess moves were inspiring for the various versions of problems which are called the Knight Covering Problem (KCP, a.k.a. N-KCP) (Jackson and Pargas 1991, Fisher 2003, Lemaire 2003, Rubin 2003, 2004, 2005, 2007, Wei 2014). Although it has no known analytical solution, there are many approximations such as the independent set method (Güldal *et al.*, Güldal *et al.* 2019) and the Girvan-Newman clustering algorithm (Güldal 2019), and Modularity (Güldal 2020) employing knight graphs of KCP. In this study, the knight graph representation of 3-KCP is used as a case study to investigate the effect of scoring factor for the Leiden clustering algorithm. In Figure 1, the legal knights' moves are shown for every cell for 3x3 board. Thus, the corresponding graph is shown in Figure 2.

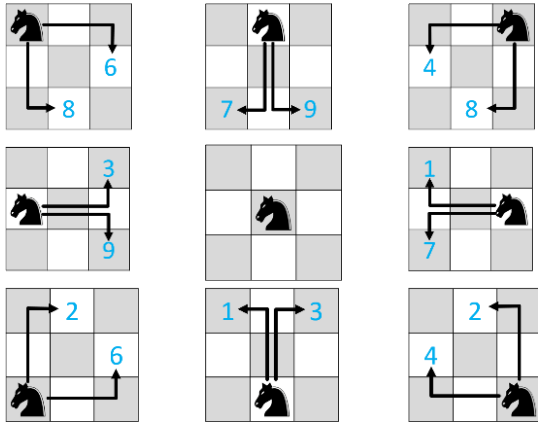


Figure 1. 3-KCP has 9 cells to position the knight.

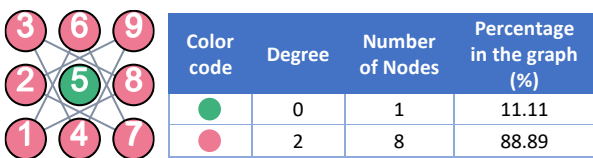


Figure 2. Graph representation of 3-KCP. The nodes are colored proportional to the degrees of nodes.

The 3x3 knight graph is shown color-coded with changing degree in Figure 2. Each vertex represents a cell on the board and is labeled by the corresponding index number. The cells on the

edges (colored pink) can attack 2 cells. The cell on the center (colored green), namely cell 5, threatens no other. Thus, the graph form of the 3x3 knight graph is composed of 9 vertices and 8 edges. The nodes have 2 degrees and no degree by the portion respectively 88.89% and 11.11%. Every knight and their relations on the board is explicitly shown in Figure 1. The graph density is 0.222, so the meaningful resolutions should be lower.

The details of the implementation and results are discussed in the following sections.

2. Method: Leiden Algorithm

We used the Leiden algorithm to identify the clusters for the 3-KCP. The clustering quality is measured by a score is calculated by Modularity and CPM. The formula for Modularity is as follows (Newman 2004):

$$Q_{Modularity} = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(c_i, c_j) \quad (1)$$

where δ -function is 1 if $c_i = c_j$; in other words, node i and j are in the same cluster. m stands for the number of edges in the graph. k_i is the degree of node i and k_j is the degree of node j . A_{ij} represents the weights of the edge between nodes i and j . It is the same for all since the effect of all knights is equal. Lastly, γ is the resolution parameter.

The formula for CPM is as follows (Traag, Waltman, and van Eck 2019):

$$Q_{CPM} = \sum_c \left(e_c - \gamma \binom{n_c}{2} \right) \quad (2)$$

where n_c is the number of nodes in community c . e_c is the weight of edge c . The interpretation of the resolution parameter is represented by γ .

For our analysis, we used the Gephi 0.9.2 (Blondel *et al.* 2008, Lambiotte *et al.* 2008, Bastian *et al.* 2009) with Leiden Algorithm 1.0.0 plugin. The resolutions are limited from 0.1 to 4.0 for Modularity and 0.1 to 1.0 for CPM which are selected by the morphology of the 3-KCP graph. The analysis and implementation results will be given in the Results and Discussion section.

3. Results and Discussion

The investigated clustering information of the 3-KCP graph by Modularity and CPM score is extracted the number of communities from 1 to 9 with respect to changing resolution.

The Modularity scoring identifies the strong relationships between connected vertices. In Figure 3, the Leiden algorithm with Modularity results on 3-KCP (for resolution = 0.1 – 4.0) graphs are depicted. The resolution 0.1 is extracted 2 clusters which have no edge at all in the 3-KCP graph as shown in Figure 3.a. In Figure 3.b, 3 clusters are generated by Modularity scoring with the resolutions 0.5. For the resolution = 1.0 in Figure 3.c, the 3-KCP graph is divided into 5 clusters. For resolution 4.0, the 3-KCP is divided into 9 clusters.

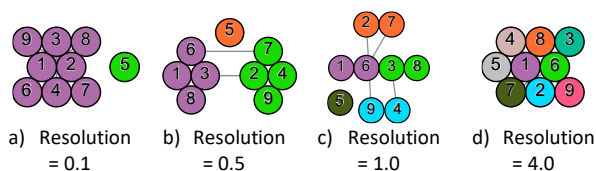


Figure 3. Leiden algorithm with Modularity quality measurement is applied to 3-KCP graphs for the resolutions from 0.1 to 4.0. Increasing resolution divides 3-KCP graph the smaller clusters.

The CPM quality function provides a similar result with lower resolutions as shown in **Figure 4**.

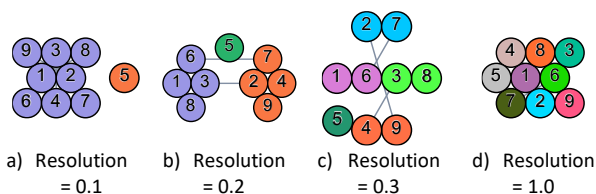


Figure 4. Leiden algorithm with CPM quality measurement is applied to 3-KCP graphs for the resolutions from 0.1 to 1.0. Increasing resolution divides 3-KCP graph the smaller clusters.

The change of quality scores against the resolution is shown in Figure 5. The quality of the cluster decreases with the increasing resolution for both quality measurements. Thus, the presented 2 clusters as a divided network are the optimum division of the network. The other point, quality of

the clusters is higher for Modularity for all clusters. Lastly, CPM has a rapid decrease of network quality score with increasing resolution, while the Leiden algorithm divides the whole graph into smaller clusters. Thus, our analysis shows CPM is more promising method for the resolution testing. This agrees with the available literature (Traag *et al.* 2011).

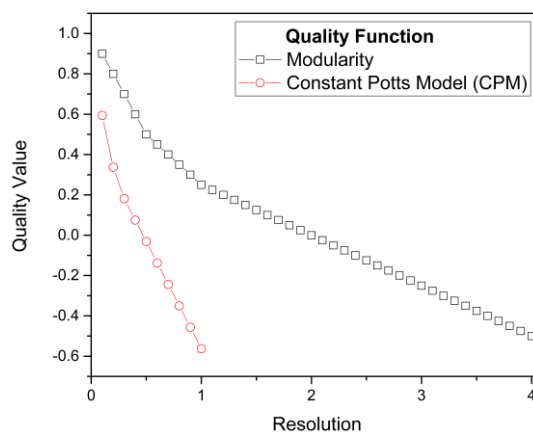


Figure 5. (Color online) Modularity and Constant Potts Model presents significant differences for 3-KCP.

The applied resolutions for the Modularities are between 0.1 to 4.0 to cluster the 3-KCP graph. In Figure 6, the increasing resolutions divide the network into greater numbers of clusters. The Modularity quality score to identify the quality of exhibited clusters does not correlate with the number of clusters. The highest Modularity score is 0.9 (for resolution 0.1) and, the lowest Modularity score is -0.5 for the resolution 4.0.

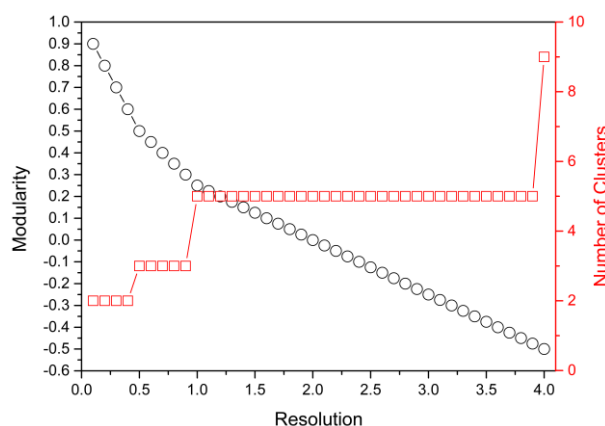


Figure 6. (Color online) Leiden algorithm is applied with Modularity as quality measurement.

In Figure 7, CPM scoring is presented with changing resolution from 0.1 to 1.0. Although it shows a similar trend with the Modularity quality score, it speeds up the clustering process. The continuous decrease in the resolution score, from 0.59375 to -0.5625, shows that 2 clusters are the most appropriate division of the network.

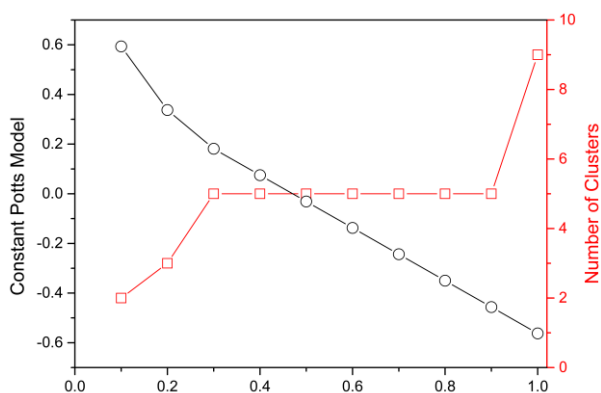


Figure 7. (Color online) Leiden algorithm is applied with Constant Potts Model as quality measurement.

4. Conclusion

In this study, we have applied the Leiden algorithm with Modularity and CPM network quality scoring factor into 3×3 knight graph. Therefore, we compared the specified quality scoring factors for the dense and regular graph by means of Leiden algorithm. The analyses show resolution 0.1 is the computationally optimal resolution to find the best clusters for both quality factors. The Modularity has a higher quality score, 0.9, than CPM, 0.59375, for the resolution 0.1. The continuous decrease in the quality of clusters observed for both cases regards the increasing resolution. On the other hand, the CPM is more receptive to the resolution change, so our analysis agrees with the previous studies.

Based on our analysis, the CPM is a promising method to speed up clustering the network into smaller clusters with a lower range of the resolution change.

Acknowledgment

The authors declare no conflict of interest.

5. References

- Ahlgren P, Chen Y, Colliander C, van Eck NJ. 2019. Community Detection Using Citation Relations and Textual Similarities in a Large Set of PubMed Publications. Paper presented at the ISSI.
- Aliquippa P, Pennsylvania, 2020. Thematic Knight's Tour Quotes
- Bai S, Liao X, Qu X, Liu Y. 2006, 3-6 Nov. 2006. Generalized Knight's Tour Problem and Its Solutions Algorithm. Paper presented at the 2006 International Conference on Computational Intelligence and Security.
- Bai S, Zhu G, Huang J. 2013, 14-15 Dec. 2013. An Intelligent Algorithm for the (1,2,2)-Generalized Knight's Tour Problem. Paper presented at the 2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security.
- Bastian M, Heymann S, Jacomy M. 2009. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. Paper presented at the International AAAI Conference on Weblogs and Social Media.
- Blondel VD, Guillaume J-L, Lambiotte R, Lefebvre EJJosmt, experiment, 2008. Fast unfolding of communities in large networks. **2008** (10), P10008.
- Boy JDJoOSS, 2020. textnets: A Python package for text analysis with networks. **5** (54), 2594.
- Clifford T, Bruce J, Matta J. 2019. Using node-based resilience clustering to predict and analyze medical data. Paper presented at the 2019 IEEE Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB).
- Delei J, Sen B, Wenming D. 2008, 12-14 Dec. 2008. An Image Encryption Algorithm Based on Knight's Tour and Slip Encryption-Filter. Paper presented at the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering.
- Delvenne J-C, Schaub MT, Yaliraki SN, Barahona M. 2013. The stability of a graph partition: A dynamics-based framework for community detection. In *Dynamics On and Of Complex Networks, Volume 2*, 221-242, Springer.
- Demaio J, Mathew B, 2011. Which Chessboards have a Closed Knight's Tour within the Rectangular Prism? *Electr. J. Comb.*, **18**. doi:10.37236/495
- Devi JC, Poovammal EJPCS, 2016. An analysis of overlapping community detection algorithms in social networks. **89** 349-358.

- Dong R, Yuan G-CJBB, 2020. GiniClust3: a fast and memory-efficient tool for rare cell type identification. **21** 1-7.
- Esmailian P, Jalili M, 2015. Community Detection in Signed Networks: the Role of Negative ties in Different Scales. *Scientific Reports*, **5** (1), 14339. doi:10.1038/srep14339
- Fisher DC, 2003. On the $n \times n$ Knight Cover Problem. *Ars Comb.*, **69**.
- Gibbs H, Liu Y, Pearson CA, Jarvis CI, Grundy C, Quilty BJ, Diamond C, Eggo RMJNC, 2020. Changing travel patterns in China during the early stages of the COVID-19 pandemic. **11** (1), 1-9.
- Girvan M, Newman MEJ, 2002. Community structure in social and biological networks. **99** (12), 7821-7826. doi:10.1073/pnas.122653799 %J Proceedings of the National Academy of Sciences
- Güldal S. (2019). Connectives of Knights Covering Problem By Girvan-Newman Clustering. Paper presented at the SDPS 2019 Workshop, Madrid, Spain.
- Güldal S, 2020. Identification of Knights' Relations For 5×5 Knight Graph by Modularity. *Journal of Engineering Science of Adiyaman University* **7**(13), 104-114.
- Güldal S, Lipscomb M, Tanik MM. (2019). Solving Knights Covering Problem: Backtracking, Permutation, Bipartite Graph, and Independent Set. Paper presented at the Nineteenth Annual Early Career Technical Conference, Birmingham, Alabama USA.
- Güldal S, Tanik MM, Lipscomb MM. Solving Knights Covering Problem by a Hybrid Algorithm. Paper presented at the IEEE SouthEastConn, Huntsville, Alabama.
- Hingston P, Kendall G. (2004). Ant Colonies Discover Knight's Tours (Vol. 3339).
- Hou QB, Yang XF, Wang YS, Huang XS, 2004. An image scrambling algorithm based on wavelet transform and Knight's tour. **41**, 369-375.
- Jackson AH, Pargas RP, 1991. Solutions to the $N \times N$ Knights Covering Problem. *Journal of Recreational Mathematics* **23**, 255-267.
- Jian H, Sen B. 2009, 7-8 March 2009. An Efficient Algorithm for the Generalized (1,k)-Knight's Tours Problem. Paper presented at the 2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science.
- Kumar A, 2008. Non-crossing Knight's Tour in 3-Dimension.
- Kumar J, Nirmala S. 2015, 10-13 Aug. 2015. Securing the contents of document images using knight moves and genetic approach. Paper presented at the 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI).
- Lambiotte R, Delvenne J-C, Barahona MJapa, 2008. Laplacian dynamics and multiscale modular structure in networks.
- Lemaire B, 2003. Knights Covers on $N \times N$ Chessboards. *J. Recr. Math.*, **31**, 87-99.
- Li B, Gould J, Yang Y, Sarkizova S, Tabaka M, Ashenberg O, Rosen Y, Slyper M, Kowalczyk MS, Villani A-CJNM, 2020. Cumulus provides cloud-based data analysis for large-scale single-cell and single-nucleus RNA-seq. **17** (8), 793-798.
- Miura T, Asatani K, Sakata I. 2020. Classifying Sleeping Beauties and Princes Using Citation Rarity. Paper presented at the International Conference on Complex Networks and Their Applications.
- Newman MEJ, 2004. Analysis of weighted networks. *Physical Review E*, **70** (5), 056131. doi:10.1103/PhysRevE.70.056131
- Parberry I, 1997. An Efficient Algorithm for the Knight's Tour Problem. *Discrete Applied Mathematics*, **73**, 251-260. doi:10.1016/S0166-218X(96)00010-8
- Pasimeni F, 2020. The Origin of the Sharing Economy Meets the Legacy of Fractional Ownership.
- Philip A, 2013. A Generalized Pseudo-Knight's Tour Algorithm for Encryption of an Image. *IEEE Potentials*, **32** (6), 10-16. doi:10.1109/MPOT.2012.2219651
- Rubin F, 2003. Improved Knight Coverings. *Ars Combinatoria*, **69**.
- Rubin F. (2004). Knight Covers for the 50×50 Chessboard. Paper presented at the Mathfest 2004, Providence RI.
- Rubin F, 2005. A Family of Efficient Knight Covering Patterns. *Journal of Recreational Mathematics*, **33** (3), 165-175.
- Rubin F, 2007. An Improved Method for Finding Knight Covers. *Ars Combinatoria*, **82**.
- Singh M, Kakkar A, Singh M, 2015. Image Encryption Scheme Based on Knight's Tour Problem. *Procedia*

Computer Science, **70**, 245-250.
doi:10.1016/j.procs.2015.10.081

Traag VA, Van Dooren P, Nesterov YJPRE, 2011. Narrow scope for resolution-limit-free community detection. **84** (1), 016114.

Traag VA, Waltman L, van Eck NJ, 2019. From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*, **9** (1), 5233-5233.
doi:10.1038/s41598-019-41695-z

van Laarhoven T, Marchiori EJC, 2013. An axiomatic study of objective functions for graph clustering.

Van Laarhoven T, Marchiori EJTJoMLR, 2014. Axioms for graph clustering quality functions. **15** (1), 193-215.

Wang C, Wang F, ssOmega TJTiG, Network optimization approach to delineating health care service areas: Spatially constrained Louvain and Leiden algorithms.

Wei F, 2014. Research on Knight Covering Based on Breadth First Search Algorithm. *Applied Mechanic and Materials*, **686**, 377-380.

Güvenlik Sistemleri için Silah ve Bıçak TanımaŞahin IŞIK¹, Şerif Ercan ÖZKAN², Zühal KURT^{3*}^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.³ Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara.

e-posta: sahini@ogu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1768-7104>serifercanozkan@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3141-3126>

Sorumlu yazar: zuhal.kurt@atilim.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1740-6982>

Geliş Tarihi: 11.11.2020

Kabul Tarihi: 16.06.2021

Öz

Bu çalışma, halka açık yerlerde güvenlik sorunlarının üstesinden gelmek için etkili ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Alternatif bir video gözetim sistemi olarak, önerilen yöntem videolardan silah ve bıçak nesnelere gerçek zamanlı olarak algılar ve yerleştirir. Evrimsel Sinir Ağı tabanlı nesne algılama ile bağlantılı olarak, en yüksek performansa sahip silah ve bıçak nesnelere tespit etmek için Hızlı-Bölgesel Tabanlı Evrimsel Sinir Ağı yapısı uygulanmıştır. Test görüntüleri üzerinde simülasyon gerçekleştirdikten sonra, geliştirilen sistemin F1-skor performansı yaklaşık %70 tanıma oranı olarak elde edilmiştir. Eğitilen Faster R-CNN modeli, uçak, otobüs durağı, stadyum ve güvenliğin önemli bir faktör olduğu kamu taşıtları da dâhil olmak üzere farklı halka açık yerler için kullanılabilir. Ayrıca, geliştirilen yöntem, tehlikeli nesnelere raporlanması ve bu tür nesnelere neden olduğu risklerin en aza indirilmesi açısından yerel gözetim sistemine gömülebilir.

Anahtar kelimeler

Silah Tanıma; Bıçak Tanıma; Hızlı-Bölgesel Tabanlı Evrimsel Sinir Ağı; Yerel Gözetim Sistemi

Gun and Knife Detection for Surveillance Systems**Abstract**

This study presents an effective and innovative solution to overcome the security issues/problems in public places. As an alternative video surveillance system, the proposed method detects and localizes gun and knife objects from videos in real-time. In connection with Convolutional Neural Network (CNN) based object detection, the Faster R-CNN structure was applied to detect gun and knife objects with the highest performance. After conducting a simulation on test images, we have found that the F1-score performance of the developed system is about 70% recognition rates. The trained Faster R-CNN model can be utilized for different public places, including airplanes, bus stations, stadiums, and public vehicles, where the security is an important factor. Moreover, the developed method can be embedded in the local surveillance system in terms of reporting dangerous objects as well as minimizing the risks caused by such objects.

Keywords

Gun Detection; Knife Detection; Faster-Regions with Convolutional Neural Networks; Local Surveillance System

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde, insan can ve mal güvenliği hemen hemen tüm toplumların başlıca sıkıntılarının birisi olarak nitelendirilebilir (Int Kyn. 2, 3, 5, 7). Kamera-tabanlı bir güvenlik sistemi uygulanarak; birçok hırsızlık ve suçları önlemek mümkün olmaktadır. Ayrıca, video izleme sistemleri sayesinde hırsızlığın önlenmesinden müşteri hareketlerini tespitine kadar, iş yerlerinde birçok avantaj sağlanmaktadır. Güvenlik kameralarından elde edilen video verilerinden şüpheli hareketlerin tespiti, çocuk

kaçırma olayları veya kaza görüntüleri yapay zekâ tabanlı sistemler ile önceden bulunabilmektedir.

Yapılan bir çalışmada (Tiwari *et al.* 2015) otomatik gözetim sistemi için görsel silah tespiti görevini yerine getirecek bir algoritma geliştirilmiştir. K-ortalama (K-means) algoritması ile imge segmente edilmekte ve daha sonra renge göre silahın olduğu bölge tespit edilmektedir. Segmente edilen bölgelerin silah içerebilecek şekilde olması durumunda Harris köşe bulma algoritması ile önemli

noktalar tespit edilmektedir. Sonra bu noktalar etrafında FREAK betimleyici ile öznelikler çıkarılarak silahın imgedeki olup olmadığı benzerlik oranına göre karar verilmektedir.

Yine başka bir çalışmada (Yuenyong *et al.* 2018) kızılötesi (infrared) görüntülerden bıçağın olduğu imgeler tespit edilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi kişi bıçağı gizlese bile kızılötesi kameradan bıçağın olduğu bölgelerin renkleri farklı gözlemlenmektedir. Yuenyong *et al.* 2018'de gerçekleştirdikleri çalışmada yöntem olarak (ESA) Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN) tabanlı olan GoogleNet mimarisi kullanılmıştır. Sistem 4,500 tane bıçak taşımayan ve 3,500 tane bıçak taşıyan veri kümesi üzerinden eğitilmiştir. Test aşamasında 217 tane bıçak taşıyan insanın 211 tanesi doğru olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca geliştirilen sistemde, 310 tane tane bıçak taşımayan kişi üzerinden yapılan deneyde ise 305 kişi doğru olarak sınıflandırılmıştır.

Ayrıca başka bir çalışmada Kırmızı-Yeşil-Mavi (KYM) uzayındaki renkli (RGB) imgelerden bıçağın olduğu bölgeler çerçeve içine alınmaktadır (Buckchash *et al.* 2017). Bu amaç ile önerdiğimiz çalışmada da olduğu üzere, farklı pozlardan çekilmiş bıçak görüntülerini ihtiva eden veri üzerinde eğitim aşaması gerçekleştirilmiştir. Bunun için imgeden öncelikle arkaplan çıkarılmakta, bıçağın olduğu bölgelerden Hızlı (Fast) betimleyicileri ile öznelikler bulunmakta ve son olarak Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine, SVM) ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Özellikle okullarda, stadyumlarda, havaalanları, otoparklar, devlet dairelerinde saldırganlar ellerinde bıçak ve silahlar ile taşınması durumunda tehlike saçmaktadırlar ve çoğu zaman bu silahları insan gözü ile hemen anında fark etmek mümkün olmamaktadır. Buna benzer birçok olaya her gün televizyon haberlerinde veya gazete manşetlerinde rastlanmaktadır. Bu çalışmada silah ve bıçakların yapay zekânın alt dalı olan görüntü işleme ve makinesi öğrenmesi yoluyla tespiti amaçlanmaktadır. Bu amaç için derin öğrenme tabanlı yaklaşımlarından Evrişimsel Sinir Ağları

kullanılarak sistem eğitilerek tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kodlama aşamasında Tensorflow kütüphanesi kullanılmıştır.

Çalışmanın amacı toplum içinde silahlı bir saldırgan varsa bu kişiyi kameralardan anlık olarak tespit edip orada sorumlu olan en yakın güvenlik ekibine bildirmektir. Böylece yerleştirilen kameraların olduğu bölgede güvenlik riskini en aza indirmeye çalışılmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak; bu çalışmada derin öğrenme teknikleri kullanarak silah ve bıçak tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Ön İşleme ve Veri Kümesi

sınıf	Örnek#01	Örnek#02	... Örnek#n
silah			
bıçak			

Şekil. 1. Silah ve bıçak veri setine ait bazı görseller.

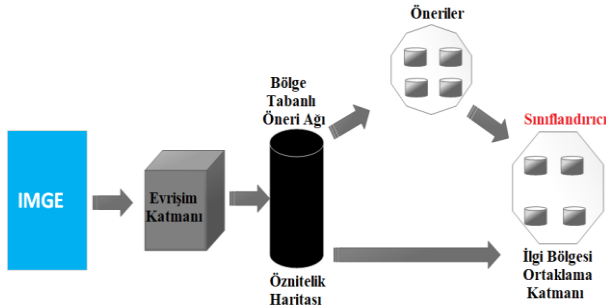
İmgelerinden silah ve bıçak objelerinin yeri belirlenirken labeling programı (Int Kyn. 4) kullanılmıştır. Objelerin koordinatları *.xml şeklinde kaydedilmiştir. Daha sonra elde edilen *.xml dosyalarını eğitim (train) ve test olmak üzere iki farklı *.csv dosyası halinde saklanmıştır. Silah tanıma için Kanada üniversitesinin araştırma grubuna ait veri kümesi tercih edilmiştir (Int Kyn. 6). Yine bıçak tanıma için 'Knife Image Database' veritabanı kullanılmıştır (Matiolański *et al.* 2016).

2.2 Faster R-CNN Metodu

Güvenlik konusunda geçmiş uygulamalara baktığımızda genellikle X-Ray cihazlar, havaalanında, askeri bölgelerde veya otoparklarda aktif olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak New Jersey eyaletinde bulunan Rutgers Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda kablosuz internet (wifi) sinyalleri ile silahların tespit edilebileceği ortaya çıkmıştır (Int Kyn. 1). Yine başka bir çalışmada (Int Kyn. 7), kızılötesi sinyalleri ile silah tespiti yapan sistem geliştirmiştir. Ama araştırmalarımız

doğrultusunda görüntüler üzerinden silah tespiti yapan sistemlere ilişkin projeler ve çalışmalar çok az sayıdadır.

- Çalışmamızda özgün olarak derin öğrenme yaklaşımlarından Hızlı-bölgesel tabanlı evrimsel sinir ağı (Faster R-CNN) modeli (Ren *et al.* 2015), oluşturduğumuz silah ve bıçak veri kümesi üzerinde yeniden eğitilmiştir.
- Platformdan bağımsız olarak kullanılan Tensorflow python kütüphanesi tercih edilmiştir.
- Eğitilen model, taşınabilir/portatif özelliğine sahip olarak birçok çalışmada kullanılabilecektir.
- Eğitim aşamasında 2.586 bıçak ve 2.287 silah imgesi kullanılarak Faster R-CNN modeli ile eğitilmiştir.
- Ayrıca, validasyon aşaması için 721 tane bıçak ve 557 tane silah imgesi kullanılmıştır.
- Faster R-CNN modeli eğitilirken 150,000 iterasyon, L2 regularizasyon ve Softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi için Olasılıksal Dereceli Azalma Momentum metodu (Stochastic Gradient Descent with Momentum, SGDM) kullanılmıştır.



Şekil 2. Faster R-CNN yapısı.

Önerdiğimiz çalışmanın temelinde derin öğrenme ve nesne tanıma gibi konu başlıkları yer almaktadır. Bu çalışmada bıçak ve silah tanıma işlemini ESA yapılarından olan Faster R-CNN yöntemi ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Faster R-CNN ile hedefteki nesnelerin videolarda tespit edilmesinin doğruluk oranı en üst seviyeye taşınmıştır.

Faster R-CNN hız olarak R-CNN algoritmasına (Girshick *et al.* 2014) göre daha hızlı çalışmaktadır. Bölge önerisini selektif/seçici arama ile yapmak yerine, bölge önerisini ağ yapısı (network) içerisinde aramaktadır. Faster R-CNN de girdi/input olarak bir imge almakta ve imgeyi evrimsel sinir ağından

geçirip bir öznitelik haritası çıkarmaktadır. Daha sonra bu aşamada selektif arama ile bölge önerisi almak yerine ayrı bir bölge önerisi ağı oluşturmaktadır. Artık bölge önerilerini bu ağ üzerinde yapmaktadır. Ağ bölgeleri belirlendikten sonra geri kalan işlemler Fast R-CNN ile benzer şekilde gerçekleştirilmektedir.

Belirlenen bölgeler yeniden şekillendirdikten sonra elde edilen öznitelikler tam bağlantılı katmanlardan (fully connected layer) geçirilmekte ve sınıflandırma yapılmaktadır. Bu işlemi gerçekleştirirken eğitim için gereken 4 farklı parametre kullanılmaktadır. Hem bölge önerisi veren ağ eğitilmekte hem de normal konvolüsyonel işlemler yapılan ağ eğitilmektedir. Bölge önerisi yapan ağın 2 tane görevi vardır. Her öneri için orada nesne olup olmadığına karar vermesi gerekmektedir. Aynı zamanda nesnenin tespit edildiği pencere büyüklüğü belirlenmelidir. Faster R-CNN ağı, sınıflandırma işlemini gerçekleştirerek baktığı bölge içerisinde nesne bilgisini çıkarmaktadır. Daha sonra bulunduğu nesnenin sınırlarını belirlemektedir.



Şekil 3. CNN tabanlı silah ve bıçak tanıma sistemi.

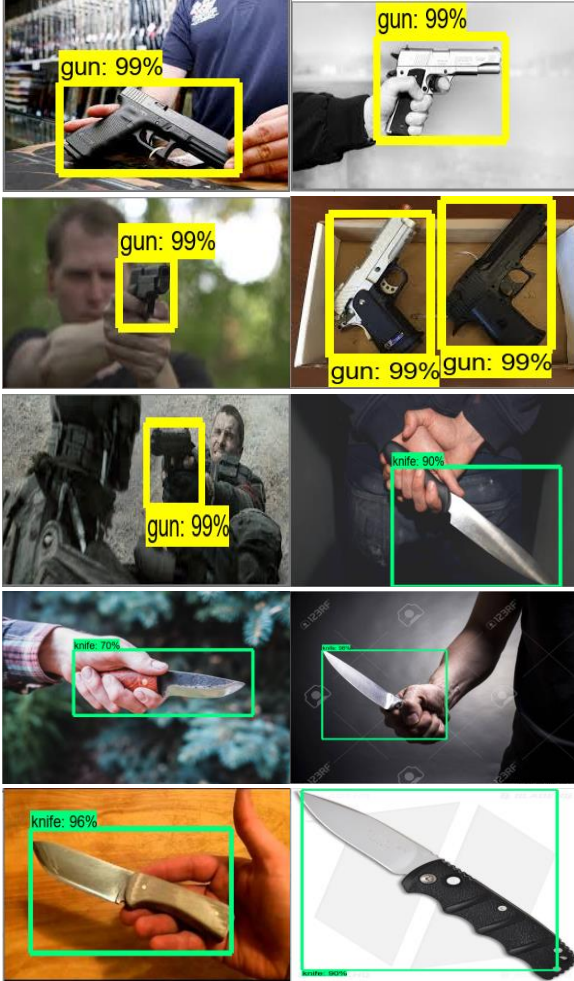
Önerdiğimiz sistemin çalışma prensibi Şekil 3'te gösterilmiştir. Öncelikle Faster R-CNN modeli eğitilmektedir. Daha sonra gelen test resimleri ile sistem gerçek zamanlı olarak test edilmektedir.

- Geliştirdiğimiz sistemde eğitilmiş Faster R-CNN modeli her türlü alanda; havaalanı, otogar, stadyum, toplum taşıma araçları ve devlet dairelerinde kullanılabilecektir.

- Oluşturduğumuz model platformdan bağımsız olarak herhangi bir mobil uygulamada veya yazılım dili ile beraber kullanılabilir.
 - Oluşturulan sisteme farklı silah veya tehlike saçabilecek nesnelere eklenerek geliştirilebilir.
- Yerli güvenlik sistemlerine kolaylıkla entegre edilebilir.

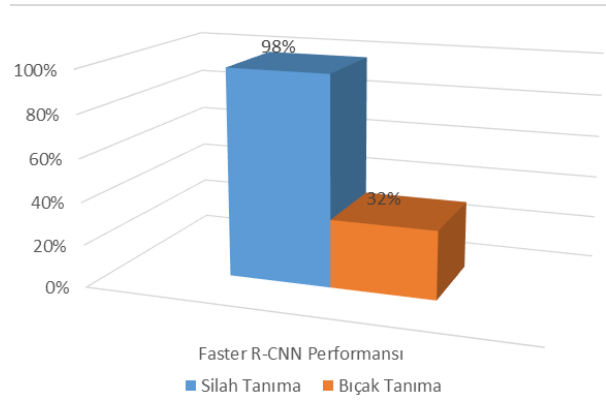
3. Bulgular

3.1 Performans Analizi



Şekil. 4. Silah (gun) ve bıçak (knife) tanıma görsel sonuçları.

Şekil 4'te görüldüğü gibi Faster R-CNN yüksek doğruluk oranıyla silah tanıyabilmektedir. Bıçak tanıma yaparken bazı imgelerden daha düşük performans sergilemektedir. Bunun nedeni bıçak objeleri çok küçük olduğunda Faster R-CNN yapısı tanımakta zorlanmaktadır.



Şekil. 5. Silah ve bıçak tanıma üzerine sayısal sonuçlar.

Şekil 5'te Faster R-CNN modelinin sayısal olarak performans analizi yapılmıştır. Bunun için 50 bıçak imgesi ve 50 silah imgesi test olarak kullanılmıştır. Eşik değeri 70% oranına göre silah veya bıçak bulma skorları not edilmiştir. Elde edilen skora göre silah tanıma 90% performans ile yapılmaktadır. Diğer yandan bıçak tanıma işlemi 32% doğruluk oranıyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge. 1. 100 imge için silah ve bıçak tanıma sonuçları.

Ölçütler	Değer
Doğruluk (Accuracy): Silah	90%
Doğruluk (Accuracy): Bıçak	32%
F1-Skor	69.76%
Kesinlik (Precision)	56.96%
Duyarlılık (Recall)	90.00%
TP	45
FP	34
TN	16
FN	5

Önerdiğimiz sistemin doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skor değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Toplam 100 imge üzerinden yapılan deneylerde True Positive (TP), False Positive (FP), True Negative (TN) ve False Negative (FN) değerleri üzerinden kesinlik ve duyarlılık ölçütleri hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlere göre önerdiğimiz sistemde yaklaşık olarak 70% oranında F1-skor değeri elde edilmiştir. False Negative değeri ise 5 olarak bulunmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Tensorflow nesne tanıma kütüphanesi kullanılarak gerçek zamanlı bıçak ve silah tanıma uygulaması geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde gerçek imgeler üzerinde eğitilmiş Faster R-CNN modeli kullanılarak yüksek performans ile bıçak ve silah tanıma işlemi

gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda hızlı bir şekilde imgelerden elde edilen bıçak veya silah bölgeleri çerçeve içine alınabilmektedir. Geliştirilen model yaklaşık olarak %70 oranında F1-skor ölçütü değeriyle bıçak ve silah tanıyabilmektedir.

İlerleyen çalışmalarda elde edilen Tensorflow modeli bir mobil uygulamaya veya gerçek zamanlı olarak çalışacak şekilde gömülü bir sisteme entegre edilebilir.

5. Kaynaklar

Buckchash H. and Raman B., 2017, A robust object detector: application to detection of visual knives, International Conference on Multimedia & Expo Workshops, IEEE2017, 633-638.

Girshick R., Donahue J., Darrell T. and Malik J., 2014. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 580-587.

Matiolański A., Maksimova A. and Dziech A., 2016. CCTV object detection with fuzzy classification and image enhancement, *Multimedia Tools Applications*, **75**, 10513-10528.

Ren S., He K., Girshick R. and Sun J., 2015. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 91-99.

Tiwari R.K. and Verma G.K., 2015. A computer vision based framework for visual gun detection using harris interest point detector, *Procedia Computer Science*, **54**, 703-712.

Yuenyong S., Hnoohom N. and Wongpatikaseree K., 2018. Automatic detection of knives in infrared images, *Int. ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering*, IEEE2018, 65-68.

İnternet kaynakları

1- bbc.com, <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-45195900>, (05-06-2021).

2- everytownresearch.org, <https://everytownresearch.org/gun-violence-america/>, (05-06-2021).

3- Hurriyet.com, <http://www.hurriyet.com.tr/kelebek/saglik/her-yil-3-bin-kisi-silahla-oluyor-27289543>, (05-06-2021).

4- labeling, <https://github.com/tzutalin/labelImg>, (05-06-2021).

5- nytimes.com, <https://www.nytimes.com/2018/12/18/us/gun-deaths.html>, (05-06-2021).

6- weapons-dataset, <https://sci2s.ugr.es/weapons-detection>, (05-06-2021).

7. youtube.com, <https://www.youtube.com/watch?v=qV6hy28C8-8>, (05-06-2021).

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035201 (570-578)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035201 (570-578)

DOI: 10.35414/akufemubid.890076

Araştırma Makalesi / Research Article

FV Panel Temizliği için Doğrusal Motor ve Mekanizma Tasarımı

Mustafa EKER¹, Yusuf AVŞAR², Ahmet FENERCİOĞLU³,^{1,3} Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Tokat.² Trakya Üniversitesi, İpsala Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Edirne

Sorumlu yazar e-mail: mustafa.eker@gop.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1085-0968>

yusufavsar@trakya.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5431-9285>

ahmet.fenercioglu@gop.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-6868>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 25.06.2021

Öz

Anahtar kelimeler

Fotovoltaik;
Gölgelenme; Doğrusal
FDAM; Verimlilik

Fotovoltaik (FV) sistemlerin ilk kurulum maliyeti yüksek iken genel sistem verimliliği düşüktür. Bundan dolayı kurulan sistemin maksimum verimlilik ile çalışması hedeflenmektedir. Verimliliği etkileyen unsurlardan biri de panel yüzeyinin toz/kar/kirlenme gibi çeşitli nedenlerle kaplanmasıdır. FV panele gelen ışınların geçmesine engel olan bu durumlarının giderilmesi için bir süpürücü mekanizma tasarlanmış ve tahrik elmanı olarak kullanılmak üzere Doğrusal Fırcasız Doğru Akım Motoru (FDAM) tasarımı yapılmıştır. Doğrusal FDAM'nin Sonlu Elamanlar Yöntemi (SEY) ile magnetostatik ve statik stres analizleri yapılmış ve tasarıma ait sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar tasarlanan Doğrusal FDAM sistem için gerekli kuvveti üretebildiğini göstermiştir. Ayrıca sistem için öngörülen enerji tüketim hesabı yapılmıştır. Doğrusal FDAM'nin süpürücü mekanizması ile yapacağı enerji tüketiminin, sistem verimliliğine etkisinin yanında çok düşük kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lineer Motor and Mechanism Design for PV Panel Cleaning

Abstract

Keywords

Photovoltaic; Shading;
Linear BLDC; Efficiency

Although the initial setup cost of photovoltaic systems is high, overall system efficiency is low. Therefore, the established system is aimed to work with maximum efficiency. One of the factors affecting efficiency is that the panel surface is covered for various reasons such as dust / snow / pollution. A sweeping mechanism has been designed to eliminate these situations that prevent the passage of the rays coming to the PV panel, and a Linear Brushless Direct Current Motor (BLDC) motor has been designed to be used as a drive element. Magnetostatic and static stress analyzes of Linear BLDC were made with Finite Elements Method (FEM) and design results were obtained. The results showed that the designed Linear BLDC motor is capable of generating the power required for the system. In addition, the energy consumption calculation foreseen for the system has been made. It has been concluded that the energy consumption of Linear BLDC with its sweeping mechanism remains very low in addition to its effect on system efficiency.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Fosil yakıtların rezervlerindeki sorunlarla birlikte çevreye verdiği zararlar sebebiyle alternatif enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır. Son yıllarda enerji, üzerinde çalışma yapılan alanların başında gelmektedir. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal, biokütle, hidrolik, hidrojen ve su enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarından yararlanma üzerine birçok araştırma/çalışma yapılmaktadır. Güneş enerjisi de bu alternatif enerji kaynaklarından

biridir ve önem bakımından ilk sıralarda yer almaktadır. Ayrıca bazı alternatif enerji kaynaklarının da temelini oluşturmaktadır (Panwar *et al.* 2011). Güneş enerjisinden elektrik üretimi farklı yöntemlerle yapılmaktadır (Panwar *et al.* 2011, Mekhilef *et al.* 2011, Khatib *et al.* 2012). Fotovoltaik paneller, güneş enerjisinden elektrik üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerdendir (Kannan and Vakeesan 2016).

Enerji üretim alanında, FV sistem ile elektrik üretimi diğer kaynaklarla kıyaslandığında havayı kirletmemesi, tükenmeyen enerji kaynağı olması, iklim değişikliğini pozitif anlamda desteklemesi ayrıca su kullanılmadığı için sularda kirlenme oluşturmaması gibi birçok avantaja sahiptir. Fakat yüksek kurulum maliyeti ve düşük enerji verimliliği FV sistemlerinin dezavantajların başında gelmektedir. FV sistemlerinin verimliliği önemli olduğu için ilk kurulum aşmasında birçok alandaki (Kannan and Vakeesan 2016, Saleem *et al.* 2016, Boztepe 2017, Owusu and Asumade-Sarkodie 2016) tasarım kriterleri dikkatlice incelenmelidir. Enerji üretiminin yanı sıra enerjinin kullanımı da büyük önem taşımaktadır. FV sistemlerde de tasarlanan sistemden maksimum enerjinin elde edilmesi hedeflenmektedir. FV sistem verimliliği buldukları bölgedeki güneş ışınlarının yoğunluğuna ve ortam sıcaklığına bağlıdır. FV sistemde maksimum enerji elde etmek için paneller Maksimum Güç Noktasında (MGN) çalıştırılırlar (Premkumar *et al.* 2020). FV panellerden üretilen MGN farklılık göstermektedir. FV sistemden maksimum gücü elde edebilmek için maksimum güç noktası takip sistemleri kullanılmaktadır (Mei *et al.* 2011, Adly *et al.* 2012, Ibrahim 2013, Kuo *et al.* 2001, Webber and Riley 2013, Agarwal and Agarwal 2014). Bir FV sistemden elde edilen gücü maksimum düzeye çıkarmak için birçok farklı yaklaşım vardır, bunlar basit voltaj ilişkilerini kullanmaktan daha karmaşık çoklu örnek tabanlı analize kadar uzanmaktadır (Çanka Kılıç 2015).

Çeşitli faktörlerden dolayı güneş ışınlarının yoğunluğu farklılık göstermektedir. Bu faktörlerin başlıcaları; güneş ışınlarının geliş açısının günlük/yıllık bazda değişiklik göstermesi, panel yüzeyinin toz/kar/kirlenme gibi çeşitli nedenlerle kaplanması, bölgenin bulutluluk oranı ve ağaç/bina gibi etkenlerden panelin gölgelenmesi olarak söylenebilir. FV panellerde meydana gelen kısmi/tam gölgelenme güç çıkışını azaltmakta ve farklı MGN üretmektedir. Gölgelenme; kar, kir, toz veya farklı parçacıkların panel üzerini kaplaması ve panellerin yakınında bulunan binaların, ağaçların veya diğer nesnelerin panellerin üzerinde oluşturduğu gölge olarak iki durumda incelenebilmektedir (Maghami *et al.* 2016).

Gölgelenmenin oluşumu ve etkileri üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda gölgelenme/kirlenme durumunun sistem verimliliğini %70'lere kadar etkilediği görülmüştür (Maghami *et al.* 2016, Ronnaronglit and Maneerat 2019, Vaghani *et al.* 2019). Günümüzde panellerin üzerinde biriken kalıntıların temizlenmesi için genellikle manuel ve su bazlı temizleme solüsyonları kullanılmaktadır (Deb and Brahmabhatt 2018). Gölgelenme FV panellerin güç çıkışını değiştirmekte ve dolayısıyla panel ömrünü de olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple FV panel sistemlerinde panel yüzeylerinin yılda en az iki kez temizlenmesi gerekmektedir (Vasiljev *et al.* 2013). Son yıllarda gelişen teknoloji ile FV panel temizliğinde otomatik sistemler veya robotlar kullanılmaktadır (Ronnaronglit and Maneerat 2019, Vaghani *et al.* 2019, Patil *et al.* 2018, Jawale *et al.* 2016, Saadsaoud *et al.* 2016). Yapılan çalışmalarda temizleme sisteminin panellerle beraber kurulduğu durumların yanı sıra ayrı bir temizleme robotu şeklinde kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Yapılan çalışmalar temizleme sistemlerinin %40 seviyelerine kadar enerji verimliliği sağlayabildiği görülmektedir. Geleneksel olarak kullanılan döner motorlar doğrusal hareket gerektiren durumlarda kasa, kayış, zincir vb mekanik dönüştürücülere ihtiyaç duyarlar. Bu şekilde oluşturulan mekanizmalara düzenli bakım yapılması gerekmektedir ve bu tür sistemlerde mekaniksel arızalarla daha sık karşılaşmaktadır (Fenercioglu and Avsar 2015). Doğrusal FDAM bu tür sistemler için alternatif oluşturmaktadır. Bu tarz motorlar herhangi ek sistem veya mekanik ekipmana gerek kalmadan doğrusal hareket yapabilmektedir. Doğrusal FDAM'nın rotorları farklı yapılarla üretilebilmektedir. Mıknatıs teknolojilerindeki gelişim ile mıknatıs içeren rotor yapılı Doğrusal FDAM kullanımı artmaktadır. Kullanılan mıknatıs sayesinde daha yüksek kuvvet-akım oranına sahip motorlar üretilmektedir (Demirci ve Tuncay 2013). Bu çalışmada FV sistemlerde verimliliği etkileyen tozlanma/kirlenme durumunun ortadan kaldırılması için temizleme sistemi tasarlanmıştır. Tahrik elemanı olarak Doğrusal FDAM kullanılmıştır. Tasarlanan sistemle motorun doğrusal hareketinden yararlanılarak temizleme işleminin yapılması

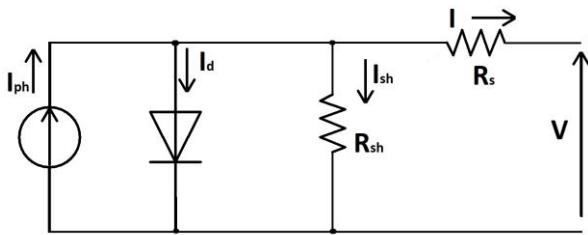
hedeflenmiştir. Sistemde dönme hareketini panel modüllerinin alt ve üst kısımlarına yerleştirilen kramiyer dişli mekanizması ile sağlanması planlanmıştır. Ayrıca yapılan sistemde doğrusal motorun üreteceği güç ve sistemin toplam güç gereksinimi hesaplanmıştır.

Bu makale 5 bölümden oluşmuştur. İlk olarak Giriş bölümü verilmiştir. Daha sonra FV panel güç çıkışı ve Doğrusal FDAM ile alakalı matematiksel denklemler verilmiştir. 3. Bölümde Tasarım ve Analiz aşamaları anlatılmıştır ve 4. Bölümde Deneysel Sonuçlar bölümü yer almaktadır. Son olarak Sonuç bölümü verilmiştir.

2. Panel Enerji Üretimi ve Doğrusal FDAM

2.1 Panel Enerji Üretimi

FV panellerin enerji üretiminde çıkışları etkileyen en temel etken ışınım miktarıdır ve dolayısıyla ışınım miktarını etkileyen faktörlerdir. FV panellerde hücrelerin seri paralel bağlanma durumuna göre farklı FV panel eşdeğer devreleri bulunmaktadır. Şekil 1'de tek diyotlu bir güneş hücresinin eşdeğer devre modeli verilmiştir (Adak vd. 2019).



Şekil 1. Güneş hücresinin eşdeğer devre modeli

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{-\frac{q(V+IR_s)}{nkT_c}} - 1 \right) - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Şekil 1'de yer alan devre FV hücre çıkış akımı I Denklem (1) ile elde edilir. Denklem (1) de verilen I_{ph} güneş ışınları sonucu oluşan hücrede oluşan foton akımını, I_0 ise diyotun ters doyma akımını temsil etmektedir. Denklemden verilen q , k ve n ifadeleri sırasıyla elektron yükünü, Boltzmann Sabitini ve ideallik faktörünü göstermektedir. R_s seri direnç, R_{sh} paralel direnç değerlerini temsil etmek için kullanılmıştır (Adak vd. 2019).

FV hücrelerde meydana gelen foton akımları açık havada ve güneş ışınlarının dik geldiği durumlarda maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bazı durumlar da (bulutlu hava vb.) foton akımlarında azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca bu durumlar kısa devre akımı I_{sc} de düşüşe neden olmaktadır. Hücre sıcaklığı da panel verimliliği için önemli bir parametredir. Hücre sıcaklığını ışınım miktarı da etkilemektedir. Nominal hücre sıcaklık değeri T_{nom} ve T_{ortam} ortam sıcaklığına bağlı olarak T_c hücre sıcaklığı;

$$T_c = T_{ortam} + \frac{T_{nom}-20}{0,8} * G \quad (2)$$

eşitliği ile elde edilir. Denklem (2)'de yer alan G güneşten gelen ışınımı temsil etmektedir. Işınım miktarının artması ile düşük sıcaklıkta maksimum verim elde edilmektedir (Adak vd. 2019). Şekilde gösterilen R_{sh} değeri R_s değerine göre çok daha yüksektir. R_{sh} değeri açık devre (∞) alındığında, I akımı;

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{-\frac{q(V+IR_s)}{nkT_c}} - 1 \right) \quad (3)$$

olur. Panellerden elde edilen akımı artırmak için hücreler paralel bağlanırken, gerilimi artırmak için ise seri bağlanırlar. Panellerde kullanılan paralel hücre sayısı N_p ile seri hücre sayısı ise N_s ile gösterilir. Hücre üzerine ışın düşmesi sonucu hücre çıkış uçlarında bir gerilim endüklenir ve bu uçlara bir yük bağlanırsa yüke doğru akım akar. FV hücrenin gerilimi (V) ve N_p ile N_s değerine bağlı panel akımı I_{panel} sırasıyla Denklem (4) ve Denklem (5) ile hesaplanır (Adak vd. 2019).

$$V = \frac{nkT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}+I_0-I}{I_0} \right) - IR_s \quad (4)$$

$$I_{panel} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(e^{-\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{1}{N_p} \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (5)$$

$R_{sh} = \infty$ alınır;

$$I_{panel} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(e^{-\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT_c}} - 1 \right) \quad (6)$$

Panel akımı Denklem (6) ile hesaplanır. FV panel çıkış gerilimi V_{panel} ise;

$$V_{panel} = \frac{nkT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_o - I + N_p}{I_o} \right) - IR_s \quad (7)$$

Denklem (7) ile hesaplanır. Panellerin çıkış güç değeri P_{panel} , panel akım ve gerilim ifadesinin çarpımı ile elde edilir. Bu nedenle Denklem (6) ve Denklem (7)'de yer alan eşitlerden;

$$P_{panel} = V_{panel} * I_{panel} = \left[\frac{nkT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_o - I + N_p}{I_o} \right) - IR_s \right] * \left[N_p I_{ph} - N_p I_o \left(e^{-\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT_c}} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

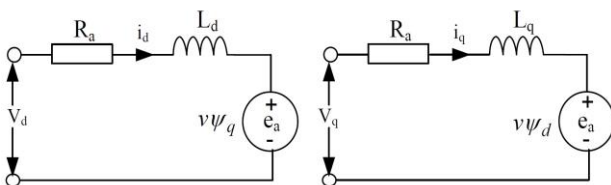
olarak elde edilir. Denklem (8) eşitliğince panellerden elde edilecek güç değerini I_{ph} değeri etkilemektedir. Bu değeri, güneş ışınlarının geliş açısı, yoğunluğu ve panel yüzeyinde ışınların geçişini etkileyecek etkenlerin bulunması direkt olarak etkilemektedir. V değeri, n tane hücreden oluşan panelde bütün hücrelerin güneşe maruz kaldığı durumda panel uçlarında oluşan panel gerilimi V_{panel} iken hücrelerin birinde gölge oluşması durumunda panel gerilimi V_g olacaktır. Gölge panel haricindeki hücrelerin üreteceği gerilim V_{n-1} ise;

$$V_g = V_{n-1} - (R_{sh} + R_s) * I \quad (9)$$

eşitliği ile bulunur (Adak vd. 2019).

2.2 Doğrusal FDAM

Doğrusal motorlar yapısal avantajlarından dolayı farklı uygulama alanlarında kendilerine yer bulmaktadır. Yapısal olarak farklı olmasına rağmen matematiksel olarak geleneksel fırçasız motorlara benzemektedir. Bu tip üç faz motorlarda iki fazlı d-q matematiksel model daha yaygın kullanılmaktadır. Şekil 2'de doğrusal fırçasız motora ait d-q eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2. Doğrusal Fırçasız motor d-q eşdeğer devresi (Dursun et al. 2015)

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v L_q i_q \quad (10)$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v (L_d i_d + \Psi_f) \quad (11)$$

Burada V_d ve V_q d-q eksen gerilimlerini i_d ve i_q d-q eksen akımlarını L_d ve L_q d-q eksen indüktanslarını, Ψ_f sabit mıknatıs akısını, τ kutup adımını, R faz sargı direncini temsil etmektedir (Dursun et al. 2015). Devrelere ait manyetik denklemler ise Denklem (12) ve Denklem (13) verilmiştir.

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \quad (12)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (13)$$

Eşitliklerde yer alan Ψ_d ve Ψ_q d-q manyetik akılarını göstermektedir (Dursun et al. 2015). Elektromanyetik itme kuvveti F_i ise;

$$F_i = \frac{3\pi}{2\tau} [\Psi_f + (L_d - L_q) x i_d] i_q \quad (14)$$

olarak verilmiştir. Eğer $i_d = 0$ alınırsa elektromanyetik itme kuvveti;

$$F_i = \frac{3\pi}{2\tau} \Psi_f i_q \quad (15)$$

olarak elde edilir. Elektromanyetik itme kuvvetinin mekanik gücü dikkate alınırsa;

$$F_i = F_d + Bv + M \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

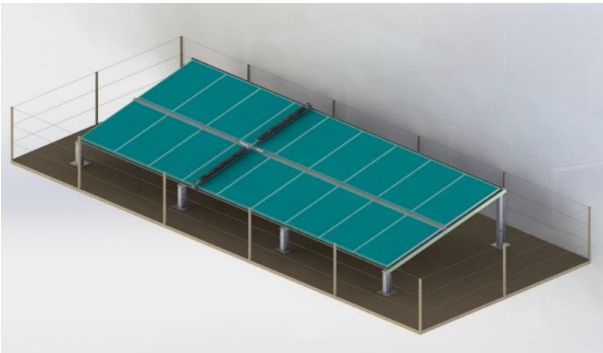
$$v = 2. f. \tau \quad (17)$$

Burada F_d harici olarak uygulanan dış kuvveti, B sürtünme katsayısını, M ve v sırasıyla hareketli alanın ağırlığını ve hızını, f frekansını temsil etmektedir (Dursun et al. 2015).

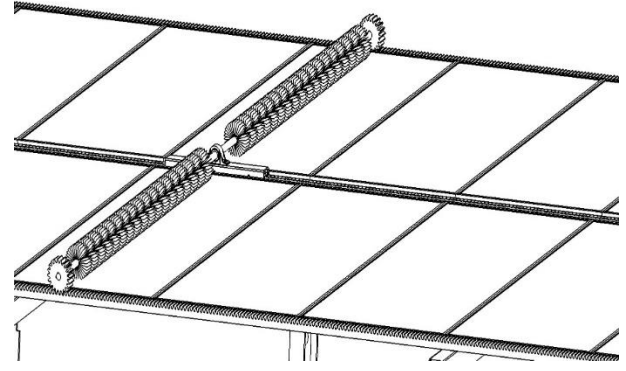
3. Tasarım ve Analiz

FV sistemlerde tozlanma/karlanma/kirlenme gibi kısmi gölgelenmeye neden olan maddelerin temizlenmesi için farklı yöntemler uygulanmıştır.

Uygulanan sistemlerin bazıları FV panel dizilerinden bağımsız iken bazıları FV panel dizleri üzerine montelenmiştir. Sisteme monte edilen temizleme sistemlerinde aktarma organları ile sistem verimliliği düşmektedir. Bu çalışma ile aktarma organlarına ihtiyaç duymadan panel temizliğinin yapılması hedeflenmektedir. FV paneller arasına yerleştirilmiş ve doğrusal hareket ile çalışan doğrusal FDAM tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlanan sistemde süpürücü ve tertibatını panel yüzeylerine paralel olacak şekilde doğrusal olarak hareket ettirecek kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Panel temizliğini sağlayacak süpürücü ve tertibatının ağırlığı yaklaşık 3 kg olarak tasarlanmıştır. Ayrıca sistemin dışarıda çalışacağı ve olumsuz hava şartları dikkate alındığında yaklaşık olarak X ekseninde 200 N bir kuvvet üretebilecek motor gerekmektedir. Bu sebeple 350 W gücünde 21 oluklu 3 fazlı bir FDAM tasarımı öngörülmüştür. Motorun boyutlandırılması Maxwell Magnetostatik'de yapılan parametrik analizlere göre gerekli olan kuvvetten daha fazla kuvvet üretebilecek şekilde tasarlanmıştır. Temizlemede kullanılan fırçalara ise motorun ileri geri doğrusal hareketi ile panel bloğunun üst ve alt kısmına yerleştirilen kramiyer dişli mekanizması kullanılarak radyal hareket kazandırılmıştır. Sisteme ait 3D katı modeller Şekil 3'de yer almaktadır.



(a) Panel sisteminin genel görünüşü

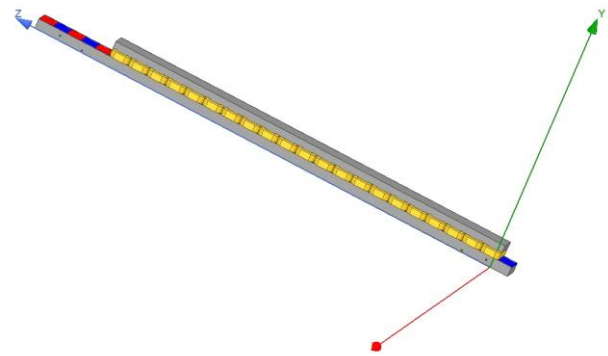


(b) Doğrusal FDAM ve süpürücü sistem

Şekil 3. Sistem 3D katı modeli

FV sistemin ilk olarak sistemin 3D katı modeli oluşturulmuştur. Sistemde 1675 x 997 x 35 mm boyutunda 18 adet panel kullanılmıştır. Sistem tasarımının en önemli parçası olan tahrik elemanı Doğrusal FDAM ise bu iki panel arasında hareket edecek şekilde konumlandırılmıştır.

Tasarımı yapılan Doğrusal FDAM üretebileceği güç Maxwell programında 3D magnetostatik analizi yapılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Doğrusal FDAM sabit kısım rotor iken hareketli kısım statordur. Stator da 21 adet bobin bulunmaktadır. Maxwell programında oluşturulan Doğrusal FDAM ait 3D görüntüsü Şekil 4'de yer almaktadır.



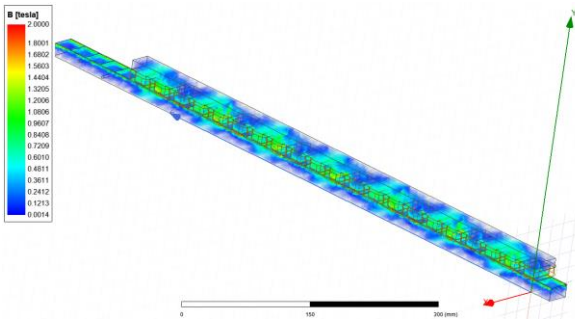
Şekil 4. SEY için oluşturulan Doğrusal FDAM

4. Deneysel Sonuçlar

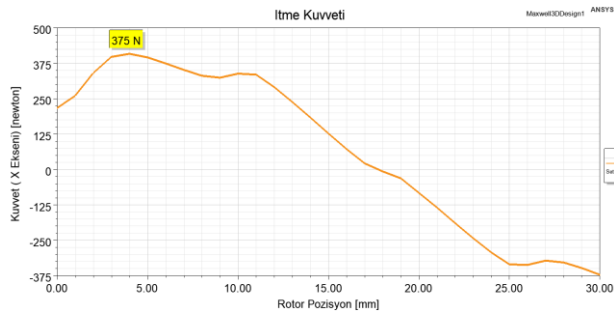
4.1 Magnetostatik analizi

Tasarlanan motorun sürme ve kontrol işlemleri (Aki ve Avşar 2016) belli bir sistem dikkat edilerek yapılmıştır. Bu sistemler Maxwell programında magnetostatik analizi gerçekleştirilen Doğrusal FDAM sürme ve kontrol işlemlerinde kullanılmıştır.

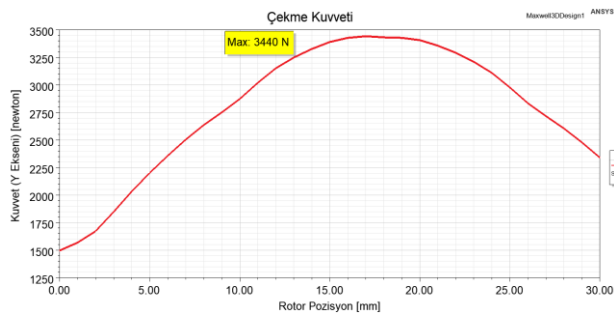
Programda malzeme tanımlamaları yapıldıktan sonra motor bobinleri üzerine uygulanacak referans akım değerleri tanımlanmıştır. Bir bobinde iletken kesit alanı $0,35 \text{ mm}^2$ olan 500 sipir sarım bulunmaktadır ve doluluk oranı %65'dir. Sipirlere 900 At manyetomotiv kuvvet uygulanmıştır. Sistemin çalışması ve temizleme işleminin yapılabilmesi, uygun kuvvet aralığında olduğu sonucu elde edilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da SEY analiz sonucu motorda meydana gelen akı yoğunluğu ve ürettiği kuvvet yer almaktadır.



Şekil 5 . SEY sonucu Doğrusal FDAM akı yoğunluğu



(a) İtme kuvveti (X Eksen)



(b) Çekme kuvveti (Y eksen)

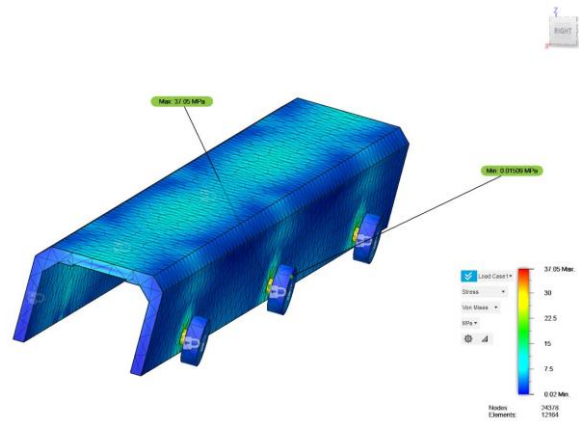
Şekil 6. SEY sonucu Doğrusal FDAM ürettiği kuvvet

Grafikler incelendiğinde stator ve rotorda meydana gelen akı yoğunluklarının maksimum 1.9 T değerine ulaştığı gözlenmektedir. Bu değer kullanılan malzemeler için sınır değer aralığında olup malzemelerin dirsek bölgesinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Şekil 6'ya bakıldığında Doğrusal

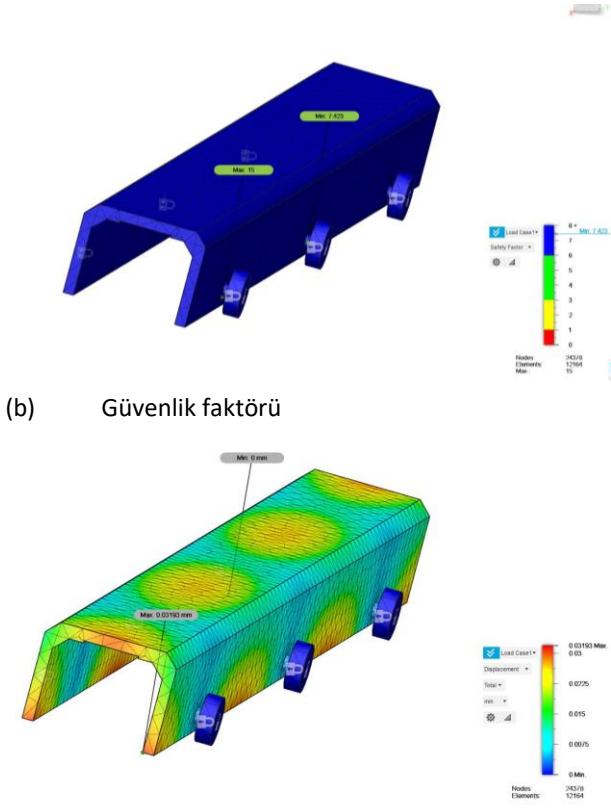
FDAM X ekseninde 375 N'luk itme kuvveti üretebilmektedir. Bu değer başlangıçta ihtiyaç duyulan kuvveti karşılamaktadır. Bununla birlikte sistemin Y ekseninde mıknatıslara doğru yaklaşık olarak 3500 N bir çekme kuvveti oluşmuştur. Oluşan çekme kuvveti sebebiyle sistemin yataklama elemanlarının yapısal olarak test edilmesi gerekmektedir.

4.2 Statik stres analizi

Yapılan Maxwell SEY analizleri sonucunda çekme (Y) ekseninde oluşan 3500 N değerindeki kuvvetin sistem üzerindeki etkisi Fusion 360 programı ile incelenmiştir. Buradaki en önemli etken mıknatıslar ile stator arasındaki hava aralığının değişmesidir. Stator ve rotor arasındaki hava aralığı 1 mm olarak tasarlanmış ve bu değer altına düşmesi hesaplamaları etkilemektedir. Ayrıca stator bloğunu tutan malzemenin alüminyum olması sistemin güvenlik faktörüne bakılmasını da gerektirmektedir. Yapılan çalışmada statorun sabitlendiği alüminyum malzemede yük, rulmanların üzerine bineceğinden rulman bölgelerinde sabitleme yapılmış ve stator bloğunun bağlandığı alanlarda 3500 N Y ekseninde yük tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada malzeme üzerindeki stres, yerdeğiştirme ve güvenlik faktörleri incelenmiştir. Şekil 7'de yapılan çalışmanın stress analizleri verilmiştir.



(a) Stres değeri



Şekil 7 Doğrusal FDAM yapısal analizi

Şekil 7-a'da malzemenin stres testi gerçekleştirilmiş en yüksek 37.05 MPa bir zorlama mevcuttur. Stres noktası AISI 1050 çeliği olduğundan AISI 1050 çeliğinin akma noktası 206 MPa'dır. Bu durumda malzeme üzerinde herhangi bir deformasyon gözlenmemektedir. Şekil 7-b malzemenin güvenlik faktörüne aittir ve en düşük durumda güvenlik faktörü 7,43 çıkmaktadır. 2,5 ve üstü güvenlik faktörü malzeme için uygulanabilir olduğundan bu değerde tasarımı başarılı kılmaktadır. Motor tasarım ve üretiminde hava aralığı hem akı geçişi hem de motor verimliliği açısından önemli bir kriterdir. Sistemdeki miktatlardan dolayı 3500 N'luk çekme kuvveti malzemenin hava aralığı ve sistemin yataklama elemanları üzerindeki yer değiştirmeler incelenmiştir. Sonuç olarak Şekil 7-c'de görüleceği üzere en yüksek noktada dahi 0,031 mm'lik bir yer değiştirme gözlenmiştir. Bu değer sistemin çalışması için engel teşkil etmemektedir.

4.3 Sistem verimlilik öngörüsü

Yapılan çalışmada FV panel temizliği için süpürücü sistem tasarlanmış ve bu sistemde tahrik elamanı

olarak Doğrusal FDAM kullanılmıştır. 350 W gücüne sahip bu motorun her çalışmada 3 kez süpürme işlemi yaptığı, her bir süpürme işlemini 2 dk da tamamladığı ve ortalama günlük 3 kez çalıştığı varsayılırsa bu motor 1 ayda toplam 540 dk çalışacaktır. Tüketeceği enerji ise 3.2 kW/ay olacaktır. Bu değere motor sürücü ve kablolama değerleri de eklenince yaklaşık 5 kW/ay enerji tüketimi yapacaktır. Bu değer 300 W'lık bir panelin 17 saatlik enerji üretimine tekabül etmektedir. Türkiye de ortalama güneşlenme süresi 7.2 saat/gün olduğuna göre tasarlanan sistemin 1 enerji üretimi 1166.4 kW/ay olacaktır. Tozlanma kirlenme karlanma gibi faktörler gölgelenme ve ışınım miktarını da etkilediği için sistem verimliliğini ortalama %9 oranında düşürmektedir. Bu oran panel grubu için 105 kw/ay'lık bir değere karşılık gelmektedir. Sonuç olarak tasarlanan doğrusal motor ve süpürücü, sistemde olumsuz etkenlerden dolayı oluşan enerji kaybının sadece %4.7'sini kullanarak enerjini kaybının önüne geçmektedir.

5. Sonuç

Enerji ihtiyacı günümüzde önemli sorunların başında gelmektedir. Bu sorunun çözümünde alternatif enerji kaynaklarından da faydalanılmaktadır. FV panel sistemleri de bu çözümlerin arasında sıklıkla karşılaşılan yöntemdir. FV panel sistemlerin kurulum maliyetleri yüksek verimlilikleri de düşük olduğundan dolayı bu sistemlerin maksimum verim ile çalışması hedeflenmektedir. Bu sistemin verimliliğini etkileyen unsurlardan biri de gölgelenme olayıdır. Gölgelenme olayı kirlenme/tozlanma ile aynı kategoride yer aldığına sistem verimliliğini yaklaşık %9 düşürmektedir. Yani gölgelenme olayının etkisini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak sistem verimliliğinde %9'luk bir verim kazancı sağlayacaktır.

Bu çalışmada gölgelenme/kirlenme/tozlanma için süpürücü bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan motor 350 W gücünde ve 375 N'luk bir itme kuvveti üretebilmektedir. Doğrusal FDAM kasnak vb. ek ekipmana gerek kalmadan panel temizliğini gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış ve ortalama 5 kW/ ay enerji tüketimi yapmaktadır. Türkiye için yapılan örnek hesaplamada bahsedilen olumsuz

etkenlerden dolayı oluşması muhtemel %9'luk enerji kaybı, sistemin toplam enerjisinin yaklaşık %0,5'i kullanılarak önlenmiştir. Bu değer ortalama değerler olarak elde edilmiş olup yapılacak çalışma algoritması ile sadece kirlenme/tozlanma/karlanma gibi durumlarda çalışma imkânı sağlanabilmektedir. Bu durum sistemin daha az çalışmasına ve daha az enerji harcamasına da neden olacaktır. Fakat bu durum bölgeden bölgeye göre değişiklik göstereceği için bazı bölgelerde tozlanmaya/kirlenmeye gölgelenme daha fazla olacağından enerji tüketimi artacaktır. Tasarlanan doğrusal motorun FV panel sistemin kurulacağı bölgenin özelliklerine göre dizayn edilme ve çalışma aralığı belirleme imkânı bulunmaktadır. Sonuç olarak tahrik elemanın Doğrusal FDAM olduğu süpürücü sistemi ek kasnak, kayış, rulman gibi ek ekipmana ihtiyaç duymadığı için mekanik kayıpları ve bakım maliyetinin daha az olacaktır.

6. References

- Adak, S., Cangi, H. ve Yılmaz, A.S., 2019. Fotovoltaik sistemin çıkış gücünün sıcaklık ve ışıma bağlı matematiksel modellemesi ve simülasyonu. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, **11(1)**, 316-327.
- Adly, M., Ibrahim, M. and El Sherif, H., 2012. Comparative study of improved energy generation maximization techniques for photovoltaic systems, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC'12)*, pp. 2-6, Shanghai, China, March 2012.
- Agarwal, N. and Agarwal, A., 2014. Mismatch losses in solar photovoltaic array. *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, **4(1)**, 16-19.
- Aki, O. ve Avsar, Y., 2016. Doğrusal fırçasız DC motorun gömülü sistem ile kontrolü. *International Academic Reseach Congress - INES 2016*, **1**, 491-499.
- Boztepe M., 2017. Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler. IV. *İzmir Enerji Verimliliği Günleri*, 14-17, İzmir, 19-20 Ocak 2017.
- Çanka Kılıç, F., 2015. Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, **56(671)**, 28-40.
- Deb, D. and Brahmabhatt, N. L., 2018. Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3306-3313.
- Demirci, R. ve Tuncay, M.T., 2013. Çift yanlı doğru akım lineer motor tasarımı. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, **7 (2013)**, 42-54.
- Dursun, M., Saygın, A., Özden, S. and Fenercioglu, A., 2015. A new design of single side brushless direct current linear motor. *Journal of Automation and Control Engineering*, **3(4)**, 336-342.
- Fenercioglu, A. and Avsar, Y., 2015. Design and analysis of EI core structured transverse ux linear reluctance actuator', *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **23(4)**, 945-955.
- Ibrahim, T., 2013. Maximum power point tracking for photovoltaic systems in rapidly-changing environmental conditions. *The 8 Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference, (JIEEC 2013)*, Jordan, April 2013.
- Jawale, J.B., Karra, V.K. , Patil, B.P., Singh, P., Singh, S. and Atre, S., 2016. Solar panel cleaning bot for enhancement of efficiency - An innovative approach. *Proceedings of the 3rd International Conference on Devices, Circuits and Systems, ICDCS 2016*, 103-108.
- Kannan, N. and Vakeesan, D., 2016. Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **62**, 1092-1105.
- Khatib, T., Mohamed, A. and Sopian, K., 2012. A review of solar energy modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16(5)**, 2864-2869.
- Kuo, Y. C., Liang, T. J. and Chen, J. F., 2001. Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **48(3)**, 594-601.
- Maghami, M.R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M.A., Rezadad, M.I. and Hajighorbani, S., 2016. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **59**, 1307-1316.
- Mei, Q., Shan, M., Liu, L. and Guerrero, J.M., 2011. A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58(6)**, 2427-2434.
- Mekhilef, S., Saidur, R. and Safari, A., 2011. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1777-1790.
- Owusu, P. A. and Asumadu-Sarkodie, S., 2016. A review of renewable energy sources, sustainability issues and

- climate change mitigation. *Cogent Engineering* (2016), **3(1)**, 1-14.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C. and Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1513–1524.
- Patil, P. A., Bagi, J. S. and Wagh, M. M., 2018. A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, 250–256.
- Premkumar, M., Subramaniam, U., Sudhakar Babu, T., Elavarasan, R.M. and Mihet-Popa, L., 2020. Evaluation of mathematical model to characterize the performance of conventional and hybrid PV array topologies under static and dynamic shading patterns. *Energies*, **13(12)**, 1-37.
- Ronnaronglit, N. and Maneerat, N., 2019. A cleaning robot for solar panels. *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST 2019*, 2019–2022.
- Saadsaoud, M., Abbassi, H.A., Kermiche, S. and Ouada, M., 2016. Study of partial shading effects on photovoltaic arrays with comprehensive simulator for global MPPT control', *International Journal of Renewable Energy Research*, **6(2)**, 413–420.
- Saleem, A., Rashid, A. and Mehmood, K., 2016. The Efficiency of Solar PV System. *Proceedings of 2nd International Multi-Disciplinary Conference 19-20 December 2016, Gujrat*.
- Vaghani, M., Magtarpara, J., Vahani, K., Maniya, J. and Gurjwar, R.K., 2019. Automated solar panel cleaning system using IoT', *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **06(04)**, 1392–1395.
- Vasiljev, P., Borodinas, S., Bareikis, R. and Struckas, A., 2013. Ultrasonic system for solar panel cleaning. *Sensors and Actuators, A: Physical*, **200**, 74–78.
- Webber, J. and Riley, E., 2013. Mismatch Loss reduction in photovoltaic arrays as a result of sorting photovoltaic modules by max-power parameters. *ISRN Renewable Energy*, **2013**, 1–9.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035202 (579-585)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035202 (579-585)

DOI: 10.35414/akufemubid.702382

Araştırma Makalesi / Research Article

Endüstriyel Amaçlı Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Evirici Yapısı

Ersoy BEŞER¹, Esra KANDEMİR BEŞER^{1*}¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.Sorumlu yazar e-posta: esrakandemir@kocaeli.edu.tr
ebeser@kocaeli.edu.trORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4305-3415>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3200-0027>

Geliş Tarihi: 11.03.2020

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Bu makalede, endüstriyel amaçlı çok seviyeli yeni bir evirici topolojisi geliştirilmiştir. Evirici yapısında yarım H-köprü seviye modülleri bulunmaktadır. Evirici çıkış gerilimindeki seviye sayısını değiştirebilmek amacıyla seviye modüllerinin sayısı azaltılıp artırılabilir. Seviye sayısının artması ile birlikte çıkış gerilimi sinüsoidal forma yaklaşmakta ve eviricideki gerilim ve akımdaki toplam harmonik bozunumu (THB) değerleri düşmektedir. Önerilen evirici yapısı oldukça esnek ve anahtarlama sinyalleri verilen eşitlikler yardımıyla bulunabilmektedir. Anahtarlama stratejisi karmaşık değildir. Önerilen evirici yapısı farklı seviyeler için simüle edilerek gerilim ve akım dalga şekilleri elde edilmiştir. Bu dalga şekillerinin THB değerleri hesaplanmıştır. Önerilen evirici klasik Uzay Vektör Modülasyonlu (UVM) ve Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) eviriciler ile kıyaslandığında hem akım hem de gerilim harmoniklerinin birlikte düşük olduğu görülmektedir. Oysa ki klasik UVM ve DGM eviricilerde akım harmonikleri düşük olmakla beraber gerilim harmonikleri yüksektir. Önerilen evirici gerilim harmoniklerini de düşürerek bu açığı kapatmaktadır. Ayrıca klasik UVM ve DGM eviricilerin bir diğer dezavantajı anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim streslerinin (dv/dt) yüksek olmasıdır. Önerilen eviricide çıkış geriliminde seviyeler bulunduğu anahtarlar üzerindeki dv/dt stresleri de düşüktür. Dolayısıyla klasik sistemlerdeki bir diğer dezavantaj da bu yapı ile yok edilmiştir. Ayrıca geliştirilen evirici yapısı literatürdeki benzerleri ile kıyaslandığında anahtar sayısı avantajına sahiptir.

Anahtar kelimeler

Çok seviyeli evirici;
Yarım H- köprü;
Toplam harmonik bozunumu (THB);
3-faz;

Three Phase Multi Level Inverter Structure with Half H-Bridge Module for Industrial Applications

Abstract

In this paper, a new three phase multi-level inverter topology has been developed for industrial purposes. Half H-bridge level modules exist in the inverter structure. In order to change the number of levels in the output voltage, the number of level modules is changed. With the increase in the number of levels, the output voltage approaches the sinusoidal form and the total harmonic distortion (THD) values in the voltage and current decrease. The proposed inverter structure is very flexible and switching signals can be found by the generated equations. The switching strategy is not complicated. Proposed inverter was simulated for different levels and voltage and current waveforms were obtained. THD values of these waveforms were calculated. Compared with the classical Space Vector Modulation (SVM) and Pulse Width Modulation (PWM) inverters, it is seen that both current and voltage harmonics are low together. However, current harmonics are low in conventional SVM and PWM inverters, but voltage harmonics are high. The improved inverter also closes this gap by reducing the voltage harmonics. In addition, another disadvantage of conventional SVM and PWM inverters is the high voltage stresses (dv/dt) on the switching elements. Since the proposed inverter has levels on the output voltage, the dv/dt stresses on the switches are also low. Additionally, the developed inverter structure has the switch number advantage compared to its counterparts.

Keywords

Multilevel inverter;
Half H-bridge;
Total harmonic distortion (THD);
3-phase

1. Giriş

Günümüzde birçok endüstriyel uygulama için çok seviyeli eviriciler iki seviyeli eviricilere rakip olmuştur (Majareh *et al.* 2019). Çok seviyeli eviricilerde temel amaç, düşük değerli doğru akım gerilimlerin yarıiletken anahtarlama elemanları ile anahtarlanarak, çıkışta basamaklı ve yüksek değerli gerilim formunun elde edilmesidir (Majareh *et al.* 2019). Klasik iki seviyeli eviricilerin gerilim harmoniklerinin, anahtarlama elemanlarındaki gerilim streslerinin ve anahtarlama kayıplarının yüksek olması gibi olumsuzluklara karşı çok seviyeli eviricilerin bu durumdaki olumlu yönleri bu evirici tiplerini öne çıkarmıştır (Majumdar *et al.* 2020). Bu avantajları çok seviyeli eviricileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemler, motor sürücüler, aktif filtre uygulamaları, elektrikli araçlar, akıllı şebekeler, dinamik gerilim düzenleyici gibi endüstriyel uygulamalarda popüler elemanlar haline getirmiştir (Majumdar *et al.* 2020, Boora and Kumar 2019). En genel olarak çok seviyeli eviriciler, diyot kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskat bağlı H-köprü eviriciler olarak sıralanabilir (Rodriguez *et al.* 2002, Boora and Kumar 2019, Sutar *et al.* 2019). Bu yapılar klasik çok seviyeli evirici yapılarıdır (Majareh *et al.* 2019). Literatürde hem klasik çok seviyeli eviriciler hem de bunlara alternatif olan yeni topolojilerle ilgili çalışmalar oldukça yaygındır.

Sutar *et al.* (2019)' un çalışmasındaki evirici yapısı 3 fazlı diyot kenetlemeli evirici ile kaskat bağlı H-köprü evirici birleşiminden oluşmaktadır. Çalışmada 5 seviyeli eviricinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. 5 seviyeli eviricide 24 adet anahtar, 12 adet diyot, 6 adet kapasite ve 3 adet bağımsız kaynak kullanılmıştır. Dhanamjayulu *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada bir fazlı 49 seviyeli asimetrik kaskat bağlı bir yapı önermiştir. Islam *et al.* (2019), 3 fazlı kapasitör kenetlemeli 7 seviyeli evirici topolojisi kullanmıştır. Bu seviye sayısı için eviricide toplamda 36 anahtar, 24 kapasite ve 3 bağımsız kaynak bulunmaktadır. Ray *et al.* (2019) 3 fazlı kaskat H-köprü çok seviyeli evirici ile Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) tekniği kullanarak bir simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. 5 seviyeli eviricide 24 anahtar, 6 bağımsız kaynak

kullanılmıştır. Pore *et al.* (2019), yine klasik kaskat H-köprü çok seviyeli eviricide sabit frekanslı evrik sinüs DGM tekniği kullanmıştır. 5 seviyeli eviricide 24 anahtar, 6 bağımsız kaynak kullanılmıştır. Saeidabadi *et al.* (2017), çalışmasında her fazda H-köprü evirici ve buna ek yardımcı modüllerden oluşan hibrit yapıda bir evirici topolojisi önermiştir. Sabyasachi *et al.* (2017) yine her fazda H-köprü evirici ve kaynak gerilimlerini ekleme ve çıkarma işlemi yapan ek modüllerden oluşan bir topoloji önermiştir. Salem *et al.* (2016), 3 fazlı modüler yapıda çok seviyeli evirici topolojisi kullanmaktadır. Evirici faz başına 3 seviye üretebilmek için 12 anahtara ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmada çok seviyeli evirici yapısı için yeni bir topoloji önerilmektedir. Önerilen topolojinin literatürde yer alan çok seviyeli evirici yapılarına göre anahtar sayısı avantajı bulunmaktadır. Evirici modüler yapıdadır. Sistemde yer alan seviye modüllerinin sayısı artırılarak seviye sayısı kolaylıkla arttırılmaktadır. Anahtarlama stratejisi karmaşık değildir. Çıkışta çok seviyeli gerilim şekli elde edildiğinden anahtarlama elemanlarının maruz kaldığı dv/dt gerilim stresi düşüktür. Gerilim harmonikleri klasik eviricilere göre azdır. Bu avantajları ortaya koyabilmek amacıyla yapılan çalışmada evirici yapısı anlatılmış ve anahtarlama mantığı açıklanmıştır. Farklı seviyeler için önerilen evirici simüle edilmiştir. Çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri ile gerilim ve akım THB değerleri verilmiştir. Önerilen eviricinin endüstriyel birçok uygulama için uygun olduğu yapılan bu simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır.

2. Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Evirici

2.1 Evirici yapısı

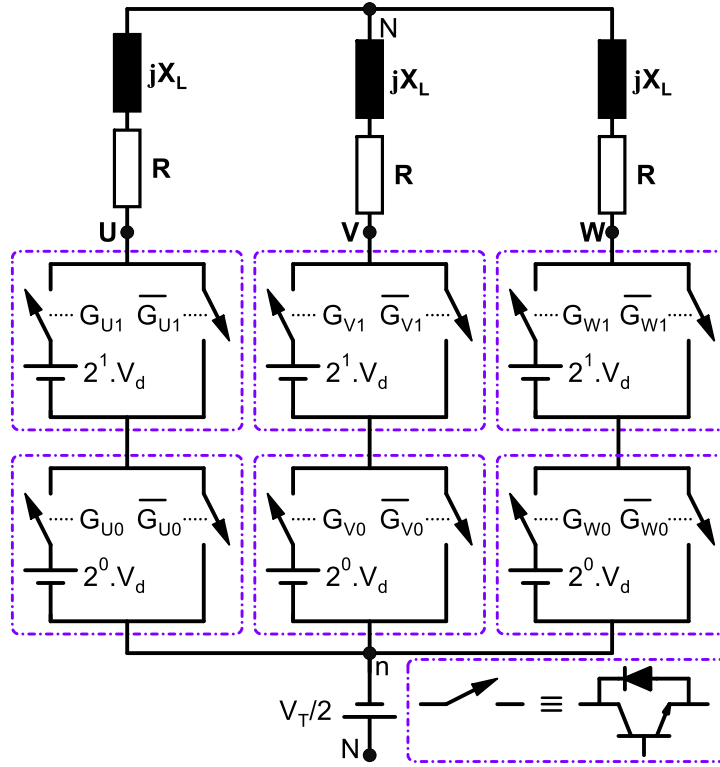
Bu çalışma kapsamında önerilen evirici literatürde yeni bir topoloji sayılabilecek bir yapı teşkil etmektedir. Önerilen evirici üç koldan oluşmaktadır. Eviricinin bir kolu bir fazlı çok seviyeli evirici yapısıdır. Her fazda gerilim seviyelerini oluşturmak için yarıiletken anahtarlama elemanlarını içeren seviye modülleri bulunur. Evirici yapısının genel şeması Şekil 1'de görülmektedir.

Bir fazda oluşacak seviye sayısı (n) seviye modülü sayısına (m) bağlı olarak Denklem (1) ile ifade edilebilir. Yine faz arası gerilim seviyesi (N) bir faz gerilim seviyesi veya seviye modülü cinsinden Denklem (2) ile ifade edilebilir.

$$n = 2^m \quad (1)$$

$$N = 2n - 1 = 2^{m+1} - 1 \quad (2)$$

Şekil 1'den de görülebileceği gibi her bir seviye modülünde iki adet yarıiletken anahtarlama elemanı ve bir adet doğru gerilim kaynağı bulunmaktadır. Şekil 1'de verilen evirici yapısında her kolda iki seviye modülü bulunduğu için Denklem (1) ve (2)'ye göre bir faz geriliminde elde edilebilecek maksimum seviye sayısı 4, faz arası gerilim seviyesi ise 7 olur.



Şekil 1. Yarım H-Köprü modüllü üç fazlı çok seviyeli evirici yapısı.

Çıkış geriliminde olması istenen referans gerilim değerinin tepe değerine göre seviye modüllerindeki gerilim kaynaklarının temel değeri Denklem (3) kullanılarak bulunabilir. Bulunan bu temel değer kullanılarak seviye modüllerindeki diğer gerilim kaynaklarının değerleri de temel değer 2^k değeri ile çarpılarak bulunabilir. Buradaki k değeri seviye modülünün numarasıdır.

$$V_d = \frac{2V_{max}}{n-1} \quad (3)$$

Önerilen evirici yapısında seviye modüllerinin dışında bir kaynağa daha ihtiyaç vardır. Bu kaynağın gerilim değeri ise bir kolda yer alan seviye modüllerinde bulunan kaynak gerilimlerinin toplamının yarısına eşit olmalıdır. ($V_T/2$)

Toplam modül sayısı (M), anahtarlama elemanı sayısı (R) ve kaynak sayısı (S) ise Denklem (4) ve (5)'te ifade edildiği gibi bulunur.

$$R = 6m \quad (4)$$

$$S = 3m + 1 \quad (5)$$

Önerilen eviricide bir fazda ve faz arası gerilimde oluşacak maksimum seviye sayıları, toplam kaynak ve anahtarlama elemanı sayıları, seviye modülü sayısına bağlı olarak hesaplanabilir.

Hesaplanan bu değerler Çizelge 1'de verilmiştir. Belirli bir modül sayısı için maksimum seviye sayısının altında değerlerde de gerilim seviyeleri üretilebilmektedir.

Çizelge 1. Seviye modülü sayısına göre hesaplanan seviye sayıları, toplam anahtarlama elemanı ve kaynak sayıları.

Seviye Modülü Sayısı (m)	1	2	3	4	m
Faz Gerilimi Seviye Sayısı (n)	2	4	8	16		2^m
Hat Gerilimi Seviye Sayısı (N)	3	7	15	31		$2^{m+1}-1$
Kaynak Sayısı (S)	4	7	10	13	$3m+1$
Toplam Anahtar Sayısı (R)	6	12	18	24		$6m$

2.2 Anahtarlama sinyallerinin elde edilmesi

Çok seviyeli gerilim şeklini evirici çıkışında oluşturabilmek için seviye modüllerinde yer alan yarıiletkenlerin uygun sırada anahtarlama gerekmektedir.

Anahtarlama sinyallerini elde edebilmek amacıyla ilk olarak üç faza ait referans gerilimler Denklem (6)'daki gibi tanımlanır.

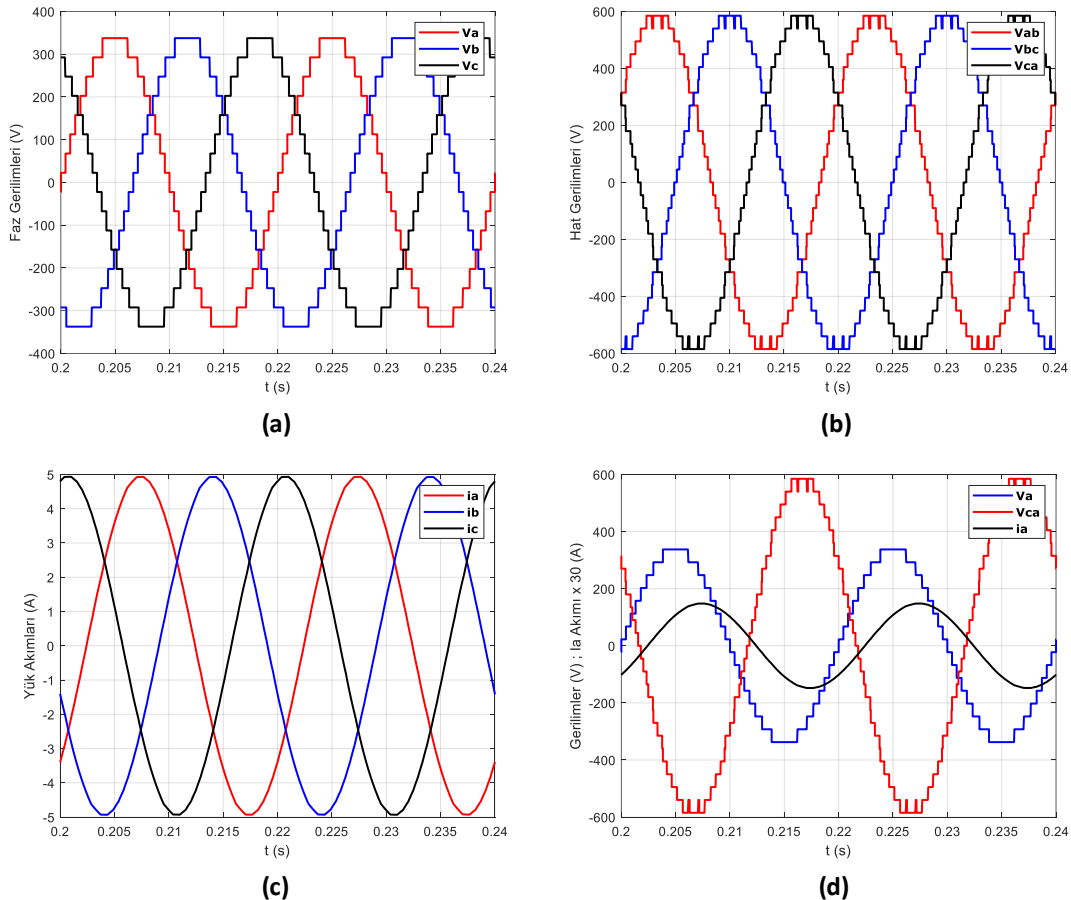
$$\begin{bmatrix} V_{a_ref} \\ V_{b_ref} \\ V_{c_ref} \end{bmatrix} = (2^{m-1} - 2^{-1}) \begin{bmatrix} 1 + \sin(\omega t) \\ 1 + \sin(\omega t + 120) \\ 1 + \sin(\omega t - 120) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Anahtarlama sinyalleri, referans gerilimlerin anlık değerlerine göre Denklem (7) kullanılarak her bir

kolda bulunan anahtarlama elemanları için oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} Q_{abc_0} \\ Q_{abc_1} \\ Q_{abc_2} \\ \vdots \\ Q_{abc_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (V_{abc_ref}) \bmod 2 \\ ((V_{abc_ref}) - (V_{abc_ref} \bmod 2^1))2^{-1} \bmod 2 \\ ((V_{abc_ref}) - (V_{abc_ref} \bmod 2^2))2^{-2} \bmod 2 \\ \vdots \\ ((V_{abc_ref}) - (V_{abc_ref} \bmod 2^k))2^{-k} \bmod 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Her bir koldaki seviye modülü sayısı kadar anahtarlama fonksiyonu kullanılmalıdır. Bu nedenle anahtarlama fonksiyonları seviye modülü numarasına göre isimlendirilerek anahtarlama sinyalleri kolaylıkla elde edilebilir.



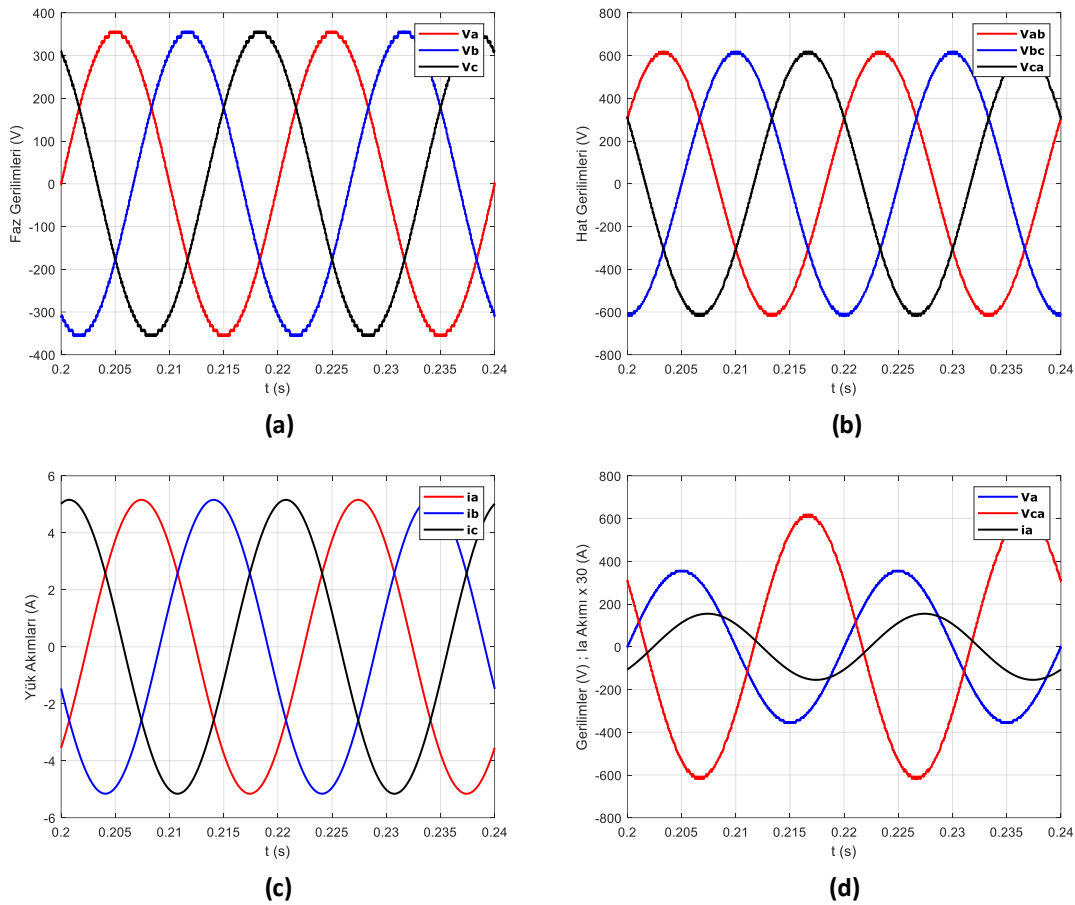
Şekil 2. 16 seviyeli eviricinin simülasyon sonuçları (a) Faz gerilimleri (b) Hat gerilimleri (c) Hat akımları (d) V_a faz gerilimi, V_{ca} hat gerilimi, i_a hat akımı.

3. Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Eviricinin Simülasyonu

Evirici yapısı simülasyon programında oluşturularak üç fazlı bir yük evirici çıkışına bağlanır. Bu çalışmada bir R-L yük tercih edilmiştir. İlk olarak çıkışta istenen gerilimin tepe değerine göre seviye modülleri içerisinde yer alan kaynak gerilimleri hesaplanır ve kaynaklar bu değerlere ayarlanır. Daha sonra üç fazlı referans gerilimler üretilerek anahtarlama sinyallerine ait formüller kullanılarak anahtarlama sinyalleri oluşturulur. Anahtarlama sinyalleri uygun elemanlara uygulanarak çıkışta çok seviyeli bir gerilim şekli elde edilir. Seviye modüllerinin sayısı

değiştirilerek yük üzerinde farklı değerlerde çok seviyeli gerilim dalga şekilleri elde edilir.

Bu çalışmada bir faz için 16 ve 64 seviyeli gerilim dalga şekilleri evirici çıkışında oluşturulmuştur. Bir fazda 16 ve 64 seviyeli gerilim oluşurken faz arası gerilim değerleri sırasıyla 31 ve 127 seviyeli olmaktadır. 16 seviyeli gerilim için eviricide toplam 24 anahtar, 64 seviyeli eviricide ise toplam 36 anahtar kullanılmıştır. Bu da literatürdeki benzerlerine göre önerilen eviriciyi anahtarlama elemanı sayısı bakımından avantajlı hale getirmektedir.



Şekil 3. 64 seviyeli eviricinin simülasyon sonuçları (a) Faz gerilimleri (b) Hat gerilimleri (c) Hat akımları (d) V_a faz gerilimi, V_{ca} hat gerilimi, i_a hat akımı.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada önerilen çok seviyeli evirici yapısı yapılan simülasyon çalışmaları ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'te verilen simülasyon sonuçlarında elde edilen gerilim dalga şekilleri tasarlanan eviricinin çok seviyeli gerilim formunu başarılı bir şekilde üretebildiğini göstermektedir. Sistemdeki seviye modülü sayısı arttıkça çıkışta elde

edilen gerilim şeklindeki seviye sayısı artmakta ve gerilim şekli saf sinüsoidal forma yaklaşmaktadır.

Evirici simülasyonları tamamlandıktan sonra faz ve hat gerilimleri ile hat akımındaki toplam harmonik bozunumu (THB) değerleri hesaplanmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen değerler Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 2. Seviye sayısına göre hesaplanan THB değerleri.

Seviye Sayısı (n)	16	64
Faz Gerilimi Toplam Harmonik Bozunumu (%)	5,15	1,03
Hat Gerilimi Toplam Harmonik Bozunumu (%)	3,95	0,85
Hat Akımı Toplam Harmonik Bozunumu (%)	0,34	0,08

Simülasyonlarda hesaplanan THB değerleri de seviye sayısı arttıkça gerilim şeklinin saf sinüsoidal forma yaklaştığını ortaya koymaktadır. Gerilim şekli sinüsoidal forma yaklaştıkça akım dalga şekli de sinüsoidal formda olmaktadır. Önerilen eviricinin klasik eviricilere göre en büyük avantajı yük gerilimindeki harmoniklerin düşük olmasıdır.

5. Sonuç

Bu çalışmada üç fazlı yarım H-köprü modüllü çok seviyeli evirici yapısı önerilmiştir. Evirici yapısında bulunan seviye modülleri aracılığıyla çıkış geriliminin seviye sayısı kolayca değiştirilebilmektedir.

Akım harmonikleri, klasik UVM ve DGM eviricilerde düşüktür fakat bu tip eviricilerde gerilim harmonikleri yüksek olmaktadır. Önerilen eviricide ise akım ve gerilim harmoniklerinin ikisi birden düşük değerli çıkmaktadır. Farklı seviye modülü sayıları için yapılan simülasyonlarda seviye sayısı arttıkça gerilim ve akımdaki THB değerlerinin azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla çıkış filtresine gereksinim duyulmaz ve eviricinin anahtarlama frekansı düşüktür.

Ek olarak anahtarlama elemanları üzerindeki dv/dt gerilim stresleri, klasik UVM ve DGM eviricilerde oldukça yüksektir. Önerilen eviricinin yapısında seri bağlı seviye modülleri bulunduğu ve çıkış gerilimi basamak şeklinde üretildiğinden dolayı yarıiletken elemanlar üzerindeki gerilim stresi düşüktür. Bu durum özellikle yüksek gerilimli uygulamalar için avantaj sağlamaktadır.

Ayrıca anahtar sayısı bakımından incelendiğinde önerilen evirici topolojisi literatürdeki benzer çalışmalara göre avantajlıdır.

Yapılan simülasyonlar, önerilen 3 fazlı evirici topolojisinin, elektrik makinaları ve elektrik tesislerinde yer alan endüstriyel uygulamalar için oldukça elverişli olduğunu göstermektedir.

5. Kaynaklar

- Boora, K. and Kumar, J., 2019. A novel cascaded asymmetrical multilevel inverter with reduced number of switches. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **55 (6)**, 7389-7399.
- Dhanamjayulu, C., Arunkumar and G. and Elangovan, D., 2019. Real-time implementation of novel 49-level asymmetric cascaded multilevel inverter. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1-5.
- Islam, N.J., Sarker, S., Merazul Islam N.M. and Reza, S., 2019. Implementation of finite control set model predictive control on 7-level flying capacitor multilevel inverter using space vector. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT 2019)*.
- Majareh, S.H.L., Sedaghati, F., Hosseinpour, M. and Mousavi-Aghdam, S. R., 2019. Design, analysis and implementation of a generalised topology for multilevel inverters with reduced circuit devices. *IET Power Electronics*, **12 (14)**, 3724-3731.
- Majumdar S., Mahato, B. and Jana, K.C., 2020. Implementation of an optimum reduced components multicell multilevel inverter (MC-MLI) for lower standing voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67 (4)**, 2765-2775.
- Pore, T.R., Rathod, A.A. and Patil, S.K., 2019. Performance analysis of cascaded H-bridge multilevel inverter with variable frequency ISPWM technique. *Innovations in Power and Advanced Computing Technology(i-PACT)*, 1-5.
- Ray, R., Shadh, M.A. and Reza, S., 2019. Cascaded H-Bridge multilevel inverter using SVPWM modulation. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT 2019)*.
- Rodriguez, J., Jih-Sheng, L. and Fang Zheng, P., 2002. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **49 (4)**, 724-738.
- Sabyasachi, S., Borghate, V.B., Karasani, R.R., Maddugari, S.K. and Suryawanshi, H.M., 2017. Hybrid control technique-based three-phase cascaded multilevel inverter topology. *IEEE Access*, **5**, 26912-26921.
- Saeidabadi, S., Gandomi, A.A., Hosseini, S.H., Sabahi, M. and Gandomi, Y.A., 2017. New improved three-phase hybrid multilevel inverter with reduced number of components. *IET Power Electronics*, **10 (12)**, 1403-1412.

- Salem, A., Ahmed, E.M., Orabi, M. and Ahmed, M., 2016. Study and analysis of new three-phase modular multilevel inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63 (12)**, 7804- 7813.
- Sutar, M.S., More, D. S. and Kumar, A., 2019. Mixed multilevel inverter topology for high power medium voltage applications. *International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 69-74.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035301 (586-605)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035301 (586-605)

DOI: 10.35414/akufemubid.864896

Araştırma Makalesi / Research Article

Çok Modlu Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemlerinin Belirsizlik Ortamında Modellenmesi

Ömer ATLI¹, Serhat AYDIN^{2*}¹ Milli savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.^{2*} Milli savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.e-posta: oatli@hho.msu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4861-5587>*Sorumlu yazar: saydin3@hho.msu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0861-8297>

Geliş Tarihi: 19.01.2021

Kabul Tarihi: 28.06.2021

Anahtar kelimeler

Proje çizelgeleme;
Bulanık çok modlu
kaynak kısıtlı proje
çizelgeleme; Tabu
arama algoritması;
Bulanık mantık.

Öz

Bu çalışmada, belirsizlik ortamında proje süreçlerinin çizelgenmesine olanak tanıyan bulanık etkinlik sürelerinden oluşan çok modlu, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemleri incelenmiştir. Proje çizelgeleme problemlerinin çözümü için Microsoft C# programlama dili kullanılarak "Proje Çizelgeleme Programı" olarak isimlendirilen bir paket program geliştirilmiş, literatürde Proje Çizelgeleme Problemleri Kütüphanesi (PSPLib) olarak bilinen örnek problem setleri üzerinde test edilerek çıktı sonuçları kıyaslanmıştır. Kaynak kısıtlı bulanık çok modlu proje çizelgeleme problemleri, geliştirilen program ile çözülerek toplam proje süreleri ve toplam çizelgeleme maliyetleri en küçüklenmektedir.

Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Under Fuzzy Environment

Keywords

Project scheduling;
Multi-Mode resource-
constrained project
scheduling; Tabu
Search Algorithm;
Fuzzy Logic.

Abstract

In this paper, we consider multi-mode resource-constrained project scheduling problems with multiple execution modes for each activity under uncertainty conditions. A software package named as "Project Scheduling Programming" was developed by using Microsoft C# and its performance was tested on some sample projects and PSPLib data sets. Project scheduling problems defined with constrained resources and uncertainty issues can be solved by by Project Scheduling Software in order to minimize total project makespan and scheduling cost.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Bir projenin başarılı olabilmesi için, etkinlik sürelerinin ve maliyet belirsizliklerinin uygun şekilde yönetilmesi, projenin hedeflenen süre ve maliyetle tamamlanması gereklidir. Literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde proje yönetiminde belirsizliklerin modellenmesi konusunda birçok çalışmanın olasılık teorisinin kullanımına dayanmakta olduğu görülmektedir. Ancak belirsizliğin modellenmesine olanak sağlayan bulanık mantık teorisi, son yıllarda proje yönetiminin temel dayanak noktalarından biri olmaya başlamış ve projelerdeki belirsizliğin ele alınmasında etkili bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bulanık mantık, uzman görüşlerini esas

alan bulanık üyelik fonksiyonları aracılığıyla projedeki zaman ve maliyet belirsizliklerini kaynak kısıtları altında modellemeye ve modelin etkin bir şekilde çözülmesini amaçlanmaktadır. Gerçek hayat problemlerinde kesin bilgiye ulaşmanın zorluğu ve maliyetinin oldukça fazla olması bu problemlerin çözümünde deterministik tekniklerin kullanılmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Ayrıca, her bir projenin kendine özgü olması ve tekrarlanmıyor olması nedeniyle tarihsel veriler oluşturulamamasından dolayı stokastik tekniklerin bu tür çalışmalarda kullanılmasında başarılı sonuçlar elde edilememesine neden olmaktadır. Bulanık mantık, proje çalışmalarında etkinlik sürelerinin istatistiksel olarak hesaplanması için yeterli veri olmadığı

durumlarda bile uzman görüşlerine başvurarak etkinlik sürelerini hesaplayabilmesi, maliyetleri uzman görüşlerine bağlı olarak belirleyebilmesi, proje uygulamalarında iyi sonuç elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Proje yönetimi temel olarak projenin hedeflerine ulaşması için planlama ve çizelgeleme faaliyetlerinin birlikte ele alındığı faaliyetler bütünüdür. Proje çizelgeleme problemleri birtakım kısıtlar altında en kısa zamanda veya en az maliyetle projelerin tamamlanmasını amaçlayan çizelgeleme problemi (Kurt, 2018). Literatürde bir çok proje çizelgeleme problemi türü vardır. Proje çizelgeleme problemlerindeki türleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Özdamar ve Ulusoy,1994)

- Tek modlu klasik kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (KKPÇ) problemleri,
- Minimum ve maksimum zaman gecikmeli KKPÇ problemleri
- Çok modlu KKPÇ (ÇM-KKPÇ) problemleri
- Minimum ve maksimum zaman gecikmeli çok modlu KKPÇ problemleri
- Minimum ve maksimum zaman gecikmeli kaynak yatırım problemleridir.

Genel KKPÇ problemleri karakteristikleri bakımından incelendiğinde; proje sayısı, mod sayısı, kaynak tüketimi ve kesilebilme durumuna göre sınıflandırılabilir. Proje sayısı bakımından; tek projeli veya çoklu proje modelleri gerçekleştirilebilir. KKPÇ problemleri, projenin işletim moduna göre tek modlu ve çok modlu olarak iki gruba ayrılabilir. Çok modlu grup projelerinde her bir etkinlik birkaç işletim modundan birinde gerçekleştirilebilir. Kaynak tüketimi bakımından projeler, kaynakların genel düzeyi sınırlı olmakla birlikte dönemsel olarak yenilenebilir veya tüm proje boyunca kısıtlı kalır. Buna ek olarak hem dönemsel olarak hem de proje süresi boyunca kısıtlı bulunan kaynaklar da mevcuttur. Kesilme durumuna göre, KKPÇ problemlerindeki etkinlikler kesilebilir veya kesilemez olmak üzere iki gruba ayrılır. Etkinliklerin kesilemez olduğu durumda, durdurulan etkinliklerin ilerleme düzeyi korunarak tekrar

sürdürülmesi mümkün olmadığından etkinliklerin kesilmesine izin verilmez. Kesilebilir etkinliklerin olduğu durumda ise, etkinlikler kesildikten sonra tekrar kaldığı yerden devam edebilir.

Proje yönetimi, büyük maliyetlerin ele alındığı, zaman tasarruflarına ihtiyaç duyulduğu ve problemlerin hesaplama karmaşıklığı henüz tam olarak çözülememiş olmaması nedeniyle üzerinde oldukça fazla çalışılan alanlardan biri olma özelliğini sürdürmektedir. Proje odaklı çalışan birçok kurum, kuruluş ve işletmeden derlenen bilgilere göre, projelerin %30'u hiçbir zaman bitirilememekte ve yılda 75 milyar dolar boşa harcanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, belirsizlik ortamında ele alınan kısıtlı kaynaklar altında bulanık çok modlu kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (BÇM-KKPÇ) problemlerinin modellenmesinde karmaşık tam sayılı doğrusal programlama tekniği kullanılmıştır. Önerilen modelin amaç fonksiyonu projenin toplam tamamlanma süresini minimize edecek şekilde kurulmuş ayrıca amaç fonksiyonu projenin toplam çizelgeleme maliyetini hesaplayabilecek şekilde modellenmiştir. Modelde farklı kaynak tipleri kullanılmıştır ve her dönemde proje için gereksinim duyulan kaynakların birim zamanda kullanım miktarlarının kısıtlı olduğu varsayılmıştır. Modelin amacı doğrultusunda kesin olmayan ve birbiri ile çelişkili bilgilerin olduğu proje verileri değerlendirmeye alınarak, uzman kararlarına dayalı olarak belirsizlik ortamının modellenmesi ve doğru kararların alınması hedeflenmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 1.1'de KKPÇ ve BÇM-KKPÇ problemleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 1.2'de Tabu arama algoritması açıklanmıştır. Bölüm 2'de Materyal ve Metot başlığıyla makalede kullanılan yöntem ve metodoloji açıklanmış, bulanık küme teorisi ile bulanık kümelerde aritmetik işlemler ve bulanık sayıların sıralama yöntemleri tanımlanmış ayrıca BÇM-KKPÇ problemlerinin tam sayılı matematiksel modeli ve yapılan varsayımlar açıklanmıştır. 3'üncü bölüm Uygulama ve Deneysel Çalışmalar başlığı altında BÇM-KKPÇ problemlerinin çözüm aşamaları

açıklanmıştır. Son bölümde, Tartışma ve Sonuç başlığı ile elde edilen bulgular ve gelecek çalışmalar tartışılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

KKPÇ problemlerinin NP-zor (polinom zamanda çözülemeyen problem) doğası nedeniyle literatürde çözüm yöntemleriyle ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Problemin sayısal karmaşıklığı, çok sayıdaki olurlu çözümler arasından en iyi çözümün seçilmesi esasına dayanmaktadır. Gerçek hayat uygulamaları için öngörülebilir bir süre içinde en iyileme yöntemleriyle KKPÇ problemlerinin optimal çözümünün elde edilmesinin NP-zor olması, henüz genel kabul görmüş bir sezgisel yaklaşımın bulunmaması, gerçek hayat problemlerindeki değişkenlerinin oluşturduğu sayısal karmaşıklığın üstesinden gelebilecek bir matematiksel model geliştirilememiş olması nedeniyle problem üzerindeki araştırmalar halen sürmektedir. KKPÇ problemlerinin her bir sınıfı için temel sorun matematik faktöriyel ve kombinasyon teorilerinin hesaplanmasındaki yetersizlik ve bilgisayar teknolojilerindeki sınırlamalardan kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, BÇM-KKPÇ problemleri ile ilgili yapılmış çalışmalardan bahsetmeden önce klasik KKPÇ modellerine yönelik literatürde yer alan çalışmalara yer verilmiştir. KKPÇ problemleriyle ilgili yapılan ilk çalışma öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemler olup, Elsayed (1982) tarafından gerçekleştirilmiştir ve projenin en erken tamamlanma zamanının en küçüklenmesi için kaynakların etkinliklere dağılımını sağlayan ve her bir kaynak türünün şebekedeki dağılımını zamana bağlı kaynak kullanım tekniği (ROT-Resources Over Time) kriterine bağlı olduğunu göstermiştir.

Talbot (1982) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, etkinlik listesinde en yüksek önceliğe sahip işler öncelikle atanmakta ve en erken zamanda başlatılmaktadır. Eğer etkinlik, dikkate alınan zaman aralığı içinde atanamazsa, yöntem bir önceki öncüle geri dönmekte ve o etkinliğin daha geç bir zamanda

yapılması veya daha yavaş bir tempo ile gerçekleştirilebileceğini ortaya konulmuştur. Patterson (1984) gerçekleştirdiği çalışmada “En kısa işlem süresi” kuralını uygulamış ve toplam proje süresini minimize edecek bir model geliştirmiştir. Bu modelde etkinlik sayısını en fazla 30 olacak şekilde kısıtlamış, 110 farklı proje üzerinde önerdiği modeli uygulamış ve öncelik kurallarının çeşitli amaç fonksiyonlarına bağlı olarak etkinliklerini incelemiştir. Uygulamadaki varsayımları şu şekildedir; Kısıtlı kaynak kullanımı, kısıtlı zaman aralığı ve projelerin rassal başlama zamanı olduğu varsayımlarıdır. Çalışmasında farklı öncelik kurallarına göre sağlanan çözümleri kesin çözümlerle karşılaştırmış ve “En küçük toplam bolluk” kuralının çoğunlukla daha iyi sonuç verdiğini, ayrıca “En küçük toplam bolluk” ile “En küçük geç başlama” kurallarının aslında birbirlerinden farklı olmadıklarını ispatlamıştır. Brucker vd. (1999), tarafından yapılan çalışmada “Kesen düzlem yöntemi” ve “Dal-sınır yöntemi” gibi temel yöntemlerin KKPÇ problemlerinin çözümünde optimal sonuca ulaşmakta yetersiz kaldığını öne sürmüş ve özel sayılama yöntemiyle geliştirdikleri model ile çözüm etkinliğinin artırılması yönünde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Glover (1990a-1990b), Atlı (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile yasaklı arama (Tabu arama) tekniğinden faydalanarak yerel optime düşmekten kaçınmak için bir hafıza fonksiyonu kullanmış ve bu şekilde global optimumu hızlı bir şekilde aramada bir veya daha çok yerel arama yöntemini hiyerarşik olarak yönlendirebilen zeki bir arama tekniğini literatüre kazandırmıştır. Zaman vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, KKPÇ problemlerinin belirsizlik ortamında çözüm önerileri sunmuşlardır. Önerilen modelde KKPÇ problemlerinde etkinlik sürelerinin tam sayılı ve gerçek değerleri yerine belirsiz olduğu varsayımı altında kesin zaman aralıklarıyla modellenebileceği ve bu sebeple benzetim yöntemiyle çözülebileceği önerilmiştir. KKPÇ problemlerinin matematiksel modelleriyle kıyaslandığında benzetim tekniğinin en fazla 120 etkinlikten oluşan 1.600 çeşit test problemi üzerinde yapılan karşılaştırmada hesaplama zamanını önemli derecede azalttığı belirtilmiştir.

Rahman vd. (2020) tarafından, KKPÇ problemlerinin çözümünde memetik algoritmanın, geleneksel genetik algoritmanın bir uzantısı olarak erken yakınsama olasılığını azaltmak için yerel bir arama tekniği olarak kullanımını önermişlerdir. Memetik algoritmaların, evrimsel hesaplamada son zamanlarda büyüyen araştırma alanlarından birini temsil etmekte olduğunu ve KKPÇ problemlerinde etkin sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Arauj vd. (2020) tarafından kesme düzlemi algoritma ile KKPÇ problemlerinin çözülebileceğini önermişlerdir. Önerilen yöntem ile 754 çeşitli problem üzerinde orijinal doğrusal programlama formülasyonu ile çözülemeyen problemlerin çözülebildiği gösterilmiştir. Pellerin vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada yazarlar KKPÇ problemlerinin çözümü için yapılan literatürde hibrit yöntemlerle yapılan çalışmalara ilişkin makale incelemesi yapmışlardır.

Bulanık Kritik Yol Metodu (B-KYM)'na yönelik Chanas ve Kamburowski (1981), Yager (1981), Nasution (1994), Zimmermann (2001), Bouleimen ve Lecocq (2003), Atlı ve Kahraman (2013) tarafından yapılan çalışmalar ile projelerde, etkinlik sürelerinin deterministik veya probabilistik şekilde belirlenmesi yerine, bulanık üyelik fonksiyonlarının kullanılmasının daha pratik ve anlamlı olduğu gösterilmektedir.

B-KKPÇ yöntemlerine ilişkin geçmiş çalışmalar ise şu şekilde özetlenmiştir; Buckley (1985) proje etkinliklerinin bolluk, en erken başlama zamanı ve en geç başlama zamanını ile olasılık dağılımının tanımını vermiştir. Üçgensel olasılık dağılımına ve etkinlik sürelerine sahip proje süresi için olasılık dağılımlarını hesaplayan yeni bir algoritma önermiştir. Dubois ve Prade (1988), etkinlik bolluğu ve en geç başlangıç zamanının olası değer kümelerini hesaplamak için, sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Belirsizlik içeren bir ortamda, son etkinliğin en geç tamamlanma süresinden farklı bir değer tanımlanmasının gerekliliği kanıtlanmıştır. Chen ve Hsueh (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bulanık etkinlik zamanlarına sahip bir proje şebekesinde kritik yolun belirlenmesi PERT yaklaşımı ve bulanık mantık teorisini birleştiren yeni bir melez model geliştirilmiştir. Gerçekleştirdikleri

çalışmada üçgensel bulanık sayılar kullanılmış, ayrıca önerdikleri modelde yeni bir olasılık indeksi tanımlayarak projenin muhtemel tamamlanma süresini hesaplayan yeni bir algoritma önermişlerdir. Wang ve Huang (2010) çalışmalarında, bulanık programlama modellerini kullanarak kaynak kısıtlı yazılım geliştirme projesinin çizelgelenmesini sağlamışlardır. Model çözümü için genetik algoritma ve bulanık simülasyon birleştirilerek melez bir yöntem geliştirmişlerdir. Knyazevaa vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada B-KKPÇ problemlerinin kabul edilebilir hesaplama zamanında sezgisel bir yöntem kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Kassandra ve Suhartonob (2018) tarafından inşaat sektöründe B-KKPÇ problemlerinde üçgensel bulanık sayıların kullanımı üzerine hesaplamalar ateş böceği algoritması ile yapılabileceği önerilmiştir. Kulejewski vd. (2018) tarafından inşaat proje çizelgelemede bulanık küme teorisi yaklaşımını B-KKPÇ problemlerinin çözümü için kullanmışlardır. Önerilen modelde; yenilenebilir kaynak kullanım seviyelerinin belirlenmesi ve projelerin zaman aralığı bakımından müşterilerin memnuniyet derecesinin maksimizasyonu amaçlandığı belirtilmiştir. Birjandi ve Mousavi (2019) tarafından, B-KKPÇ problemlerinin çözümü için yeni bir bulanık karışık tam sayılı doğrusal olmayan bir model önerilmiştir. Ayrıca proje tamamlanma maliyetinin en küçüklenmesi için ikili parçacık süre optimizasyon tekniği ile melez meta sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemle genetik algoritma sonuçları karşılaştırılmıştır.

ÇM-KKPÇ modeller ve BÇM-KKPÇ yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenmiştir; Nasution (1994) bir olayın bolluğu ve en geç müsaade edilebilir başlama zamanı için operasyonel formüller sağlamıştır. Bu çalışmada, tanımlanan P ve Q tabloları kullanılarak ve KYM sırasına paralel olarak, bir etkinliğin bolluğu ve en geç izin verilebilir başlama zamanı için operasyonel formüller sağlanmıştır.

Bouleimen ve Lecocq (1998) önerdikleri tek modlu problemler için tanımlanan Tavlama Benzetimi Yaklaşımı'nı çok modlu problemlere uyarlamıştır. Modlar etkinliklerden ayrı bir liste olarak

tutulmaktadır. Etkinlik listesindeki yer değişimi ile yeni bir etkinlik listesinin türetilmesinden sonra rasgele bir etkinlik için mod değişikliği uygulanmıştır. Özdamar ve Ulusoy (1994), ÇM-KKPC problemleri için genetik algoritma yaklaşımın içeren yeni bir model önermişlerdir. Önerdikleri modelde, ilki etkinlikler için atanmış moda ait, diğeri bir grup öncelik kuralı tarafından belirlenen ve bir kural numarası olan iki boyutlu bir kromozom yapısını kullanan kodlama yapısı kullanmışlardır. Mori ve Tseng (1997) gerçekleştirdikleri çalışmada yenilenebilir kaynakların bulunduğu ÇM-KKPC problemini ele almıştır. Çalışmalarında yeni bir genetik kodlama yapısı kullanmışlardır. Bu kodlama yapısı kromozomun her geninde bir etkinlik numarası, bu etkinlik için atanmış mod, çizelgeleme sırası ve başlama bitiş zamanları bilgilerini taşıyan bilgileri içermektedir. Önerdikleri bu modeli Drexl ve Grunewald'ın (1993) sunduğu stokastik yaklaşımla karşılaştırarak, önerdikleri kodlama yapısının daha iyi sonuçlar verdiğini ispatlamışlardır.

Hartmann (1998) çalışmasında yeni bir genetik algoritma yaklaşımı sunmuş ve çalışmasında hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen kaynakların bulunduğu bir model önermiştir. Bu çalışmada kromozom, öncüllük ilişkileri bakımından olurlu bir etkinlik sıralaması ve bu etkinlikler için seçilmiş birer modun bulunduğu bir kodlama ile sunulmaktadır. Drexl vd. (2000), etkinliklerin kesintili yapılabileceği varsayımıyla, ÇM-KKPC modelinin genel matematik formülasyonlarındaki kaynaklara ilave olarak kısmen yenilenebilir kaynaklar tanımlamıştır. Çözümün genişletilmiş simpleks yöntemi adı verilen seçeneklerle elde edilmesi esasına dayanan çok amaçlı doğrusal modeli geliştirilmiş ve çözüm yöntemleri önerilmiştir. Bu yaklaşımda, işlem bölümlerinin sayısı kontrol edilememektedir. Elde edilen çözüm üzerinde, bölünme sayısını azaltan ve sınırlayan bir yöntem uygulanmaktadır. Zaman vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ÇM-KKPC problemlerinin çözümü için etkin bir melez algoritma uygulanması önerilmiştir. Önerilen melez algoritmanın, uygun modların belirlenmesi amacıyla doğrusal programla yaklaşımını temel aldığı ve daha sonra uygun çizelgeleri belirleyebilmek amacıyla ileriye ve geriye doğru çizelge ayarlama yaklaşımlarını modifiye etmişlerdir. İki sezgisel

yöntemin birlikte kullanımı ile literatürdeki büyük test problemleri üzerinde test ettiklerini ve önerilen yöntemin uygun çözümler üretebildiğini bildirmişlerdir. Bofill vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, KKPC ve ÇM-KKPC problemlerinin çözümü amacıyla Sağlanabilir (tatmin edilebilirlik) Modül teorisi (Satisfiability Modulo Theories (SMT) eşitliği kullanılmasını önermişlerdir. Yazarlar KKPC problemlerinin doğrusal tam sayılı aritmetik teorisi ile benzerliklerinin olduğu belirtilmiş ve kaynak kısıtlarında tamsayı değişkenler yerine boolean (Boolean Satisfiability (SAT) tipi değişkenler ile formüle edilmesinin hem mod seçiminde hem de kaynak kullanımında literatürdeki var olan çalışmalardan daha etkin sonuçlar verebileceğini göstermişlerdir. Sharma ve Trivedi (2020) yaptıkları çalışmada ÇM-KKPC problemlerinin çözümünde zaman, maliyet, kalite ve güvenlik takasının etkisini belirleyecek bir meta sezgisel bir model önermişlerdir. Önerilen yöntem baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma yöntemini uyarlamışlardır. Yöntemde popülasyon için latin hiperküp örnekleme, kalite için analitik hiyerarşi prosesi ve parametreleri belirlemek için bulanık mantık kullanımı ile bahse konu zaman, maliyet, kalite ve güvenilirlik parametrenin eş zamanlı olarak etkinliğinin sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak öncelik kuralına bağlı sezgisel yöntemlerden ikisi, en küçük boşluk zamanı (MinSlack) ve zamana bağlı kaynak kullanım tekniği (Resource Over Time-ROT) öncelik kuralları dikkate alınmıştır. Modelin çözümünde Tabu arama algoritması kullanılmış, bu algoritmanın problemlerin çözümünde hem deterministik hem de bulanık ortamda etkin bir şekilde kullanılabilmesi gösterilmiştir. Önerilen yöntemin temel algoritması Tabu arama algoritmasının temeline dayanmasından dolayı Bölüm 1.2'de Tabu arama algoritması kısaca açıklanmıştır. Önerilen yöntem farklı bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılarak, yenilenebilir ve yenilenemeyen proje kaynaklarının mevcut olduğu durumlarda ve farklı proje teknik karmaşıklığı sayısal analizlerle çalıştırılarak test edilmiştir.

1.2 Tabu Arama Algoritması

Yerel arama teknikleri, mevcut çözüme ait komşu çözümlerin araştırılmasıyla, karmaşık iş problemlerine ait optimum ya da yaklaşık optimum çözüm bulma yeteneğine sahiptir. Ancak bu problemlerde karşılaşılan en büyük sorun, yerel optimuma yakalanma ve aşırı zaman kaybının oluşmasıdır. Tabu arama, daha önce incelenmiş belli sayıda çözümü, tabu listesi olarak adlandırılan bir listede tutarak, o çözümlere geri dönmeyi bir müddet engelleyen ve böylece aramayı çözüm uzayının daha iyi noktalarına yönlendiren bir arama prosedürüdür. Tabu Arama tekniğine ait ilk çalışmalar, Glover (1990a) tarafından önerilmiştir. Tabu Arama, yerel optimalliğe düşmekten kaçınmak için hafıza fonksiyonu kullanan, global optimumu hızlı bir şekilde aramada bir veya daha çok yerel arama yöntemini hiyerarşik olarak yönlendiren akıllı bir tekniktir. Algoritmanın bir yerel en iyi çözümden ayrıldıktan hemen sonra, tekrar aynı yerel en iyi çözüme yönlenmemesi için, algoritmanın attığı son adımlar tabu yani yasaklı olarak kabul edilir. Tabu listesi dinamiklidir. Her bir yeni eleman tabu listesine girdiğinde, tabu listesinde en çok kalmış olan eleman (FIFO kuralına göre) liste dışına çıkarılır. Böylece algoritmaya bir hafıza kazandırılmış olunur.

Temel olarak Tabu arama yöntemi, komşuluk arama metodunun geliştirilmiş bir şekli olarak düşünülmektedir. Tabu arama metodu, bir yerel optimal çözümde arama işlemlerini sona erdirmek yerine, daha kötü bir değere sahip olsa da yeni bir sıralamayı ele alır ve o sıralamadan arama işlemine devam eder. Yeni seçilen sıralama, bir önceki sıralamadan daha kötü ise, arama işlemi sonsuz kez tekrarlanabilir. Bu durumu önlemek amacıyla, yeni seçilen düğümden bir önceki düğüme gitmek yasaklanmaktadır. Benzer şekilde bu düğümden iki ya da üç adım önceki düğüme gitmek de yasaklanmaktadır. Yasaklanmış olan adımlar tabu listesine eklenir. Tabu arama yönteminin her aşamasında, başlangıç sıralamasının komşuları arasından tabu listesinde olmayan en iyi sıralama seçilir. Komşuluk arama yönteminde bir başlangıç sıralamasının, ne kadar çok sayıda komşusu türetilirse, performansı da o derecede artmaktadır.

Ancak komşuluk arama tekniğinde, bir yerel çözüm bulup, bu çözümü global çözüm olarak kabul etme eğilimi vardır. Tabu arama yönteminde ise, bir lokal optimal çözüm elde edildikten sonra, bu çözüm üzerinden arama işlemine devam edilir ve bu nedenle problemin, global optimal çözümüne ulaşma garantisi verilmez. Çünkü, problemin global çözümüne, belki de daha kötü amaç fonksiyonu değerine sahip olan bir sıralamadan ulaşılabilecektir. Karar ağacı üzerinde başlangıç sıralamasından daha kötü amaç fonksiyonu değerine sahip olan bir düğüm üzerinden arama yapma esnekliği, Tabu arama yönteminde mevcuttur. Tabu arama yönteminin işleyişi için belirlenmesi gereken bazı önemli stratejiler ve parametre değerleri vardır. Temel olarak başlangıç çizelgesi oluşturma yöntemi; komşuluk yapısı, tabu listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aspirasyon ölçütü, seçkin çözümler listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aramayı yoğunlaştırma ve çeşitlendirme stratejisi ve aramayı durdurma ya da iterasyon sayısı gibi parametreler algoritmanın çalışması ve performansı için gerekli değerlerdir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, belirsizlik ortamında tanımlanan ÇM-KKPC problemlerindeki NP-zor konular ve çözüm yöntemleri ele alınmıştır. Önerilen model de problem için başlangıç çözümleri bulmak amacıyla ROT değeri, her bir etkinlik kaynakları toplamını etkinliğin süresine böldükten sonra, herhangi bir yol üzerindeki şebeke aracılığıyla bir etkinliğin kontrol ettiği maksimum değer olarak belirlenir. Özetle, şebekenin yolları üzerinde, kaynaklarda zaman aşımına neden olan etkinliklerin maksimum değerine sahip olanının önceliklendirilmesi olarak da tanımlanabilir. Tüm etkinliklerin ROT değerleri bulunur ve büyükten küçüğe sıralanarak kaynakların tahsis edilebilecekleri öncelikler belirlenmiş olur. En küçük boşluk zamanı (Minslack) değerleri, KYM ve B-KYM algoritmalarından elde edilir ve küçükten büyüğe doğru sıralanarak kaynak tahsisi için gerekli öncelikler belirlenmiş olur. Sonraki adımlar, her iki yöntem (ROT ve Minslack) için de aynıdır. Uygulama bölümünde çözüm yöntemi ve geliştirilen Microsoft Visual C# 2008 programı geliştirilmiş ve çözümlenebilen BÇM-KKPC problemleri ayrıntılı

biçimde açıklanmıştır. Şekil 1'de önerilen algortimanın akış diyagramı gösterilmiştir.

Bulanık mantık teorisine göre, bulanık sistemlerin en temel elemanı bulanık kümelerdir. Bu konuda Zadeh (1965) tarafından gerçekleştirilen çalışma araştırmacılar için temel referans oluşturmaktadır. Bulanık bir küme, birden fazla üyelik derecesine sahip elemanları olan bir küme türüdür. Böyle bir küme, elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında üyelik değeri atayabilen bir üyelik fonksiyonu ile tanımlanmaktadır.

Gerçek hayat uygulamalarında projeler birçok etkinlik içermektedir. Bu projeleri sınırlı kaynak ve öncelik ilişkileri kısıtları altında çizelgeleme, mevcut problemi NP-zor probleme çevirmektedir ve problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bir projeye ait etkinliklerin süresi, net bilgi eksikliği nedeniyle (proje uygulanırken etkinlik süreleri beklenenden daha az veya çok sürebilir, kaynaklar mevcut olmayabilir, gerekli malzemeler gecikebilir, işçiler gelmeyebilir vb.) genellikle kesin verilerle ifade edilemez ve belirsizlik içerir. Bu nedenle, bulanık küme teorisi, belirsizlik içeren bu problemlerin modellenmesinde en etkin yöntemlerden biridir.

Dubois ve Prade (1988)'e göre bulanık sayılar şu özelliklere sahip olmalıdır. Üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$: $R \in [0,1]$ olan "A" bulanık sayısı için: $\mu_A(x)$, Reel sayılar kümesinden $[0,1]$ kapalı aralığında bir sürekli fonksiyondur. $\mu_A(x)$ bir konveks bulanık alt kümedir. $\mu_A(x_0) = 1$ yapan bir x_0 sayısı vardır. Yamuk Bulanık Sayı, Üyelik Fonksiyonu ve Yamuk bulanık sayılarla temel aritmetik işlemler Dubois ve Prade (1983) tarafından önerilen şekilde gerçekleştirilir.

Bulanık sayılar muğlak, kesin olarak tanımlanamayan bu nitel değerleri sayısallaştırabilmek için kullanıldığından, çeşitli uygulamalar ve proje etkinlik süreleri açısından bulanık sayıların birbirleriyle kıyaslanması ya da sıralanması oldukça önemlidir. Bu kısımda, mevcut

sıralama sorunlarını çözmek ve uygulama kolaylığı sağlamak için oldukça kullanışlı olan bir sıralama yöntemi açıklanacaktır.

A_{ij} etkinliği $FAT_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ (Bulanık etkin süreleri-Fuzzy Activity time, FAT) bulanık etkinlik süresi olarak tanımlansın. Karar vericinin risk tutum indeksi (β), şu şekilde ifade edilebilir:

$$\beta = \left[\sum_i \sum_j \frac{(b_{ij}-a_{ij})}{(b_{ij}-a_{ij})+(d_{ij}-c_{ij})} \right] / t \quad (1)$$

$f_{A_i}(x)$ üyelik fonksiyonlu A_{ij} bulanık sayısı $m_i = \min\{x | f_{A_i}(x) = 1\} + \max\{x | f_{A_i}(x) = 1\}$ olarak tanımlandığında, A_i ve A_j bulanık sayıları aşağıdaki kurallara göre sıralanabilir. Proje yönetiminde, etkinliklerin kritikliğini risk faktörü olarak değerlendiren bulanık sayılar kullanılarak, riskli etkinliklerin belirlenmesi ve bunlara göre genel proje riskinin ölçülmesi için bir yöntem önerilmiştir. Bu makalede, bir etkinliğin kritikliğinin o etkinliğin risk oranını gösterdiği kabul edilmektedir. Benzer şekilde, projenin genel riskliliğinin hesaplanması için, proje ağında bulunan riskli (kritik) etkinliklerin sayısı, bunların risk dereceleri ve proje ağındaki yerleri esas alınmaktadır.

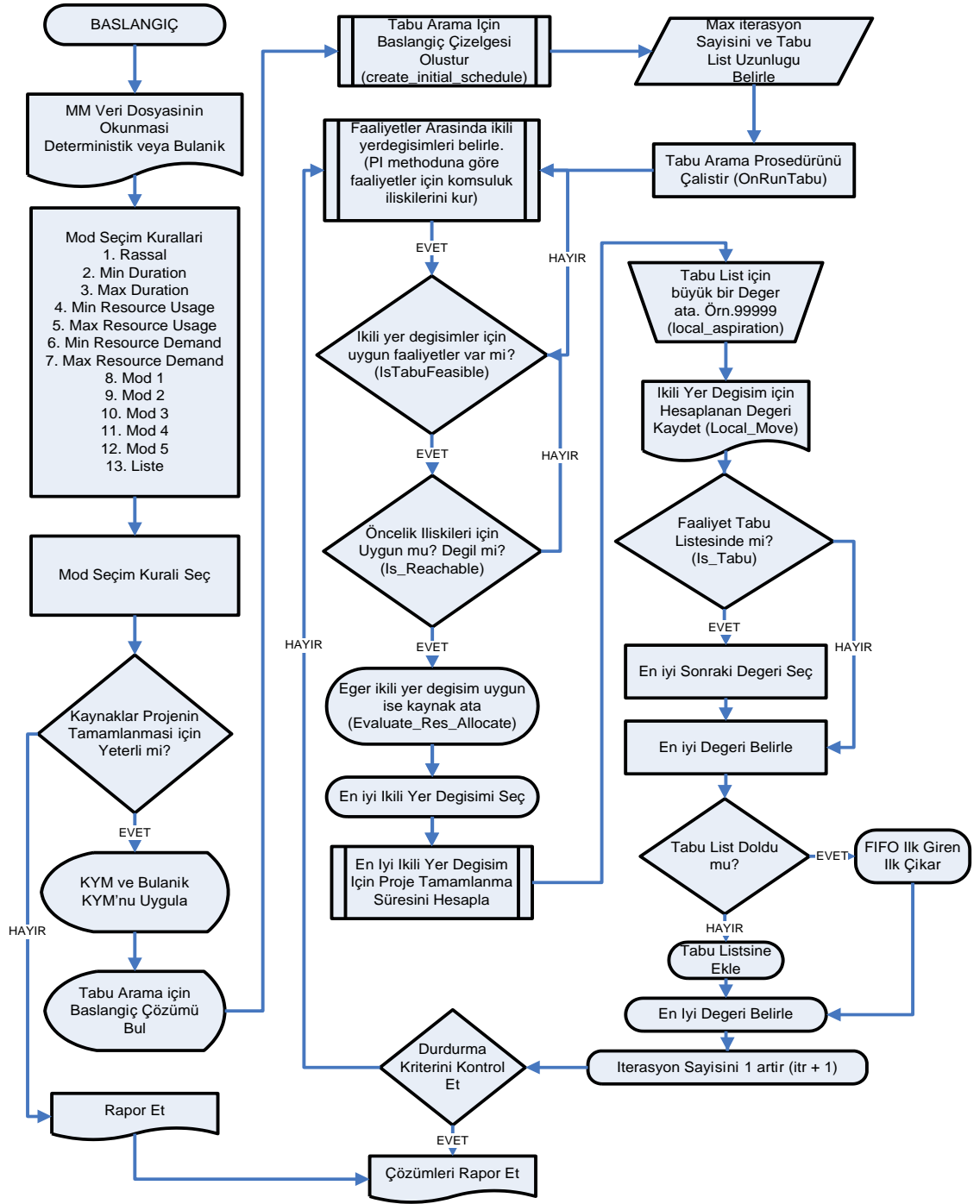
$$A_i > A_j \Leftrightarrow R(A_i) > R(A_j) \quad (2)$$

$$R(A_i) = R(A_j) \text{ ve } m_i > m_j \quad (3)$$

$$A_i = A_j \Leftrightarrow R(A_i) > R(A_j) \text{ ve } m_i = m_j \quad (4)$$

Sonraki adımda Yager (1981) tarafından önerildiği şekilde, bir A_i yamuk bulanık sayısının $R(A_i)$ sıralama değeri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$R(A_1) = \beta \left[\frac{(d_i-x_1)}{(x_2-x_1-c_i+d_i)} \right] + (1 - \beta) \left[\frac{(x_2-a_i)}{(x_2-x_1+b_i+a_i)} \right] \quad (5)$$



Şekil 1. Önerilen algoritmanın akış diyagramı

Burada β karar verici risk tutum indeksi Eşitlik (1) ve Eşitlik (5)'de $x_1 = \min\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ve $x_2 = \max\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ kullanılarak ve β değeri alınarak, n yamuk bulanık sayılarının sıralama değerleri kolayca hesaplanmaktadır. Yukarıda açıklanan sıralama kuralına dayalı olarak, n yamuk bulanık sayısının sıralaması etkili bir şekilde tespit edilmektedir. Burada gerçekleştirilen işlem ile bulanık etkinliklerin hangisinin diğerine göre küçük

veya büyük değerlere sahip olduğu belirlenebilmektedir.

BÇM-KKPC için tam sayılı doğrusal programlama modeli ve çözüm yöntemleri aşağıda açıklanmıştır. Matematiksel modeli formüle etmek için kullanılan gösterimler şu şekildedir.

t	Zaman indisi ($t = 1, \dots, T$)
j	Etkinlik indisi ($j = 1, \dots, J$)
R	Yenilenebilir kaynaklar kümesi,
d_j	j etkinliğinin süresi,
P_j	j etkinliğinin öncüllerinin kümesi,
EFT_j	j etkinliğinin en erken bitiş zamanı,
LFT_j	j etkinliğinin en geç bitiş zamanı,
k_{jr}	j etkinliğinin r kaynağından birim zaman kullanım miktarı,
K_r	r yenilenebilir kaynağının birim zaman kullanım üst sınırı,
M_j	j etkinliğinin mod adedi,
m	Mod indisi ($m = 1, \dots, M_j$),
N	Yenilenemeyen kaynakların kümesi.
C_{jr}	j etkinliğinin r kaynağının birim zamanda kullanım maliyeti

BÇM-KKPC problemleri, kısıtlı kaynaklara sahip bir projeyi oluşturan etkinliklerin, öncelik ilişkilerini dikkate alarak proje amaçlarını en iyileyecek biçimde çizelgelenmesidir. Makalede ele alınan problemin temel varsayımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Proje etkinlik sürelerinin kesin veya uzman görüşüne bağlı olarak yamuk bulanık sayı dağılımına göre modellenmiştir.

- Projenin etkinliklerinin gerçekleştirilmesi için birden fazla kaynağın farklı miktarlarda kullanılması gerekeceği kabul edilmektedir.

- Etkinliklerin birim zamandaki kaynak kullanımı sabittir. Bir etkinliğe atanan kaynak, başka bir etkinlik ile paylaşamaz.

- Başlatılan etkinlikler tamamlanıncaya kadar kesintisiz olarak sürdürülmek zorundadır, ara verilemez.

- Etkinlikler iptal edilemez, her etkinliğin gerçekleştirilmesi zorunludur.

- Toplam proje süresinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

- Kaynakların kullanım maliyetleri toplam proje maliyeti içinde modele eklenmiştir.

- Kaynak kullanım maliyetleri çizelgeleme dönemlerinde sabittir. Proje maliyetleri üzerinde mevsimsel ve enflasyonist etkiler yoktur.

- Projedeki etkinliklerin başlayabilmesi için öncül etkinliklerin tamamlanması gereklidir.

- Projenin yürütülmesinde yenilenebilir veya yenilenemeyen kaynaklar kullanılmaktadır.

- Başlangıç çizelgeler oluşturulması amacıyla MinSlack ve Rot öncelik kuralları kullanılmıştır.

- Global optimizasyon bulmak amacıyla Tabu arama yöntemi kullanılmıştır. Tabu arama algoritmasının işleyişi için belirlenmesi gereken bazı önemli stratejiler ve parametre değerleri vardır. Temel olarak başlangıç çizelgesi oluşturma yöntemi, komşuluk yapısı, tabu listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aspirasyon ölçütü, seçkin çözümler listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aramayı yoğunlaştırma ve çeşitlendirme stratejisi ve aramayı durdurma ya da iterasyon sayısı gibi parametreler algoritmanın çalışması ve performansı için gerekli değerler örnek problemler içinde verilmiştir.

- Kaynak kullanımı hem tek hem de çok modlu olarak kullanılabilir.

- Bu bölümde incelenecek problem, tek bir projenin yukarıda yapılan varsayımlar çerçevesinde projenin tamamlanma süresinin en küçüklenmesi problemi olup, modele ayrıca çizelgeleme maliyeti de dâhil edilmiştir. Ancak modele dahil edilen çizelgeleme maliyetinde optimizasyon yapılmamış, yalnızca oluşan proje maliyetleri hesaplanmıştır.

- Mod seçim kuralları;

- Modun Rassal olarak seçilmesi: 1'den M_{ij} 'ye kadar düzgün dağılımdan rassal olarak seçilen m modu ile bir etkinliğin gerçekleştirilmesi.

- MinDM (Minimum etkinlik süreli mod seçim kuralı- Min duration mode): Modlar arasında minimum etkinlik süresine sahip olanın seçilmesi. $\min_m d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ değerine sahip modun belirlenmesi.

- MaxDM (Maksimum etkinlik süreli mod seçim kuralı- Max duration mode): Modlar arasında maksimum etkinlik süresine sahip olanın

seçilmesi. $\max_m d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ değerine sahip modun belirlenmesi.

ç. MinRDM (Minimum kaynak talebi mod seçim kuralı- Minimum resource demand mode) Kuralı: Minimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi. $\min_m \sum_{r=1}^R q_{ijm} d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ değerine sahip modun belirlenmesi.

d. MaxRDM (Maksimum kaynak talebi mod seçim kuralı- Maximum resource demand mode) Kuralı: Maksimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi. $\max_m \sum_{r=1}^R q_{ijm} d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ değerine sahip modun belirlenmesi.

e. MinRMU (Minimum kaynak kullanımı mod seçim kuralı- Minimum resource usage mode) Kuralı: Minimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi. $\min_m q_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ değerine sahip modun belirlenmesi.

f. MaxRMU (Maksimum kaynak kullanımı mod seçim kuralı- Maximum resource usage mode) Kuralı: Maksimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi. $\max_m q_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ değerine sahip modun belirlenmesi.

g. Mod Seçimi: Modların isteğe bağlı olarak seçilmesi durumudur.

KKPÇ problemine göre sadece kaynak kullanımında birden fazla moda izin verilmesi, bir farklılık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde, problem tanımının daha gerçekçi olması sağlanmıştır. Aşağıdaki gösterimde, mod indisi m kullanılarak, değişkenlere ve parametrelere mod boyutu eklenmiştir. Yenilenemeyen kaynakların matematiksel gösterimini örneklemek amacı ile aşağıdaki gösterime, yenilenemeyen kaynaklar da dâhil edilmiştir. Ayrıca kullanılan eşitlikte hem toplam proje maliyetinin en aza indirilmesi amaçlanmış hem de proje süresinin toplam maliyete etkisi dikkate alınmıştır. Böylece projenin mümkün olan en kısa sürede bitirilmesi amaçlanmış, oluşan toplam proje maliyeti hesaplanmıştır. ÇM-KKPÇ'nin matematiksel programlama gösterimi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} t X_{jmt} \quad (6)$$

veya

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} C_{jr} t X_{jt} \quad (7)$$

Kısıtlar

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jmt} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} X_{jmt} \leq K_r \quad r \in R, t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} t X_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t - d_{jm}) X_{jmt} \quad j = 2, 3, \dots, J, i \in P_j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jmt} \leq K_r \quad r \in N \quad (11)$$

$$X_{jmt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad m = 1, 2, \dots, M_j; \quad t = EFT_j, \dots, LFT_j \quad (12)$$

Eşitlik 6'daki amaç fonksiyonu (Z_1) proje süresinin en küçüklenmesini ve Eşitlik 7'deki amaç fonksiyonu (Z_2) ise toplam proje çizelgeleme maliyetinin en küçüklenmesini esas almaktadır. Eşitlik 8 ise tüm proje etkinliklerinin icra edilmesini sağlamaktadır. Eşitlik 9 yenilenebilir kaynakların dönemlik kullanımlarını sınırlamaktadır. Denklem 10 ise, etkinlikler arasındaki öncelik ilişkilerini tanımlamaktadır. Eşitlik 11'deki kısıt kümesi yenilenemeyen kaynakların proje süresi içindeki tüketimlerini sınırlamaktadır. Eşitlik 12 ise, proje etkinliklerinin başlangıç zaman ve modlarını gösteren ikili değişkenleri tanımlamaktadır. Karar değişkeni X_{jmt} 'nin üç indisli olması, değişken sayısını tek modlu modele göre büyük oranda artırmaktadır. Bu nedenle, $\{EFT_j, LFT_j\}$ zaman aralıklarının en iyi çözümü dışlamayan en dar tanımı bu gösterimde daha önemlidir.

3. Bulgular

KKPÇ probleminin büyüklüğü arttıkça, kesin çözüm veren optimizasyon yöntemleriyle makul sürelerde optimal sonuçlar elde edilmesi mümkün değildir. Tabu arama algoritmasının kullanılması ile çok büyük olan çözüm uzayında, makul sürelerde, optimal veya optimale yakın sonuçlar bulunması hedeflenmiştir. Kaynak kısıtlarını da dikkate alan yöntem deterministik ve B-KKPÇ ve TM/ÇM-KKPÇ modelleri bu bölümde incelenmiş ve problemin çözümü için yeni ve etkin çözüm yöntemlerinin tanıtılması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.

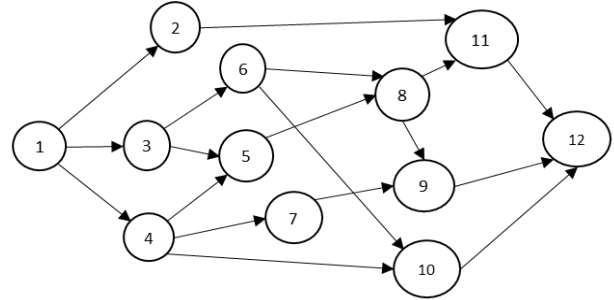
KKPÇ, B-KKPÇ, ÇM-KKPÇ ve BÇM-KKPÇ problemlerinin çözülmesi amacıyla geliştirilen "Proje Çizelgeleme-Project Scheduling" adlı program, Microsoft Visual C# bilgisayar programlama dili kullanılarak modüler yapıda oluşturulmuştur.

Çizelgeleme problemlerinde, öncül/ardıl olarak farklı iki şekilde verilen etkinlik öncelikleri göz önünde bulundurularak, algoritmanın farklı problem tipleri için çalışması sağlanmaktadır. Böylece, problem ne şekilde verilirse verilsin, kullanıcı tarafından herhangi bir dönüşüm işlemi yapılmaksızın, algoritmada çözülebilecektir. Çalışma kapsamında kullanılan problemlere ait veri yapıları ve örnek problemler PSPLib'de sunulmuştur. Algoritma, literatürde bulunan toplam 27 adet çeşitli veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Ayrıca deterministik problemler bulanık fonksiyon kullanarak bulanık yapıya dönüştürüleceği ve bu şekilde çözülebileceği gibi bağımsız bulanık verilerle ve Rangen 1-2 proje üretici program kullanılarak oluşturulan tüm problem veri kümeleri üzerinde de çalıştırılabilir. Dolayısıyla test edilecek mevcut problem sayıları çok fazla olup (yaklaşık 30.000 adet) hepsi için problemlerin çözümlerini bu çalışma kapsamında değerlendirmek mümkün değildir. Problemlerin her biri, farklı iterasyonlarda olmak üzere test edilir, varsayılan olarak problem büyüklükleri temel alınmış olup ele alınan problemin etkinlik sayısının iki katı tabu arama için maksimum iterasyon sayısı olarak kullanılmış ve problemler çözülmüştür. İterasyon sayısının etkisinin araştırılması

bakımından her bir problem, belirlenen sayıda (100, 1000, 5000 iterasyon vb.) çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve literatürde yer alan çalışmaların sonuçları kıyaslanarak sonuçlar bölümünde sunulmuştur.

3.1 ÇM-KKPÇ Problemleri için Sayısal Örnek

Literatürde PSPLIB web sayfasında <http://129.187.106.231/psplib/> dan J104_1.mm veri dosyası kullanılacaktır. Tablo 1'de örnek probleme ait bilgiler ve Şekil 2'de şebeke yapısı verilmiştir. Yapay etkinliklerle birlikte toplam 12 etkinlikten oluşan örnek problemde dört farklı kaynak kullanılmış 2 kaynak türü yenilebilir, 2 kaynak türü yenilenemeyen kaynaklardan oluşmakta olup, her bir kaynağın maksimum elde edilebilir miktarları sırasıyla 9, 7, 59, 52'dir. Her bir etkinlik üç modda icra edilebilmektedir.



Şekil 2. J104_1. mm örnek verisine ait Şebeke Diyagramı

Çizelge 1. J104_1.mm veri dosyası

Etkinlik Toplam Sayısı 12		Kaynak Sayısı:4			
Maksimum Kaynak Miktarı	R1	R2	NR1	NR2	
	9	7	59	52	
MOD 1	Süreler	1.Kaynak Türü Kullanımı	2.Kaynak Türü Kullanımı	3.Kaynak Türü Kullanımı	4.Kaynak Türü Kullanımı
1	0	0	0	0	0
2	7	6	0	6	0
3	7	7	0	0	8
4	5	3	0	8	0
5	7	0	5	0	4
6	8	6	0	6	0
7	8	3	0	6	0
8	7	0	8	2	0
9	2	0	7	0	9
10	5	9	0	4	0
11	5	0	10	0	7
12	0	0	0	0	0
MOD 2	Süreler	1.Kaynak Türü Kullanımı	2.Kaynak Türü Kullanımı	3.Kaynak Türü Kullanımı	4.Kaynak Türü Kullanımı
1	0	0	0	0	0
2	7	6	0	6	0
3	7	7	0	0	8
4	5	3	0	8	0
5	7	0	5	0	4
6	8	6	0	6	0
7	8	3	0	6	0
8	7	0	8	2	0
9	2	0	7	0	9
10	5	9	0	4	0
11	5	0	10	0	7
12	0	0	0	0	0
MOD 3	Süreler	1.Kaynak Türü Kullanımı	2.Kaynak Türü Kullanımı	3.Kaynak Türü Kullanımı	4.Kaynak Türü Kullanımı
1	0	0	0	0	0
2	8	5	0	6	0
3	9	0	1	9	0
4	9	3	0	0	5
5	8	0	4	8	0
6	9	5	0	2	0
7	8	0	4	6	0
8	10	1	0	0	5
9	8	0	5	0	4
10	10	0	8	2	0
11	10	9	0	0	5
12	0	0	0	0	0

Deterministik / BÇM-KKPC Algoritması

Adım 1. İlgili kurallardan birine göre mod seçimi gerçekleştirilir.

Bu adımda uygulanacak modlar aşağıda belirtilmiştir.

Minimum süre kuralı: Bir etkinlik için 3 mod bulunmaktadır. 3 mod için yeterli kaynak varsa, minimum etkinlik süresine sahip mod seçilir. Eğer modlarda aynı süreye sahip etkinlikler varsa, seçilen kaynak tipine göre minimum kaynak kullanımına sahip etkinlik olan mod seçilir.

Maksimum süre kuralı: Bu kural, maksimum etkinlik süresi olan modun seçimini içermektedir. Eşit süreli mod varsa, minimum kaynak kullanımı olan mod seçilir. Minimum kaynak kullanımı olan modun seçilmesi: Seçilen kaynak tipinde minimum kaynak ihtiyacı olan modun seçimi. Eğer eşit kaynak

kullanımı olan etkinlikler varsa, minimum süreye sahip olan etkinliğin mod'u seçilir.

Maksimum kaynak kullanımı olan modun seçilmesi: Seçilen kaynak tipinde maksimum kaynak ihtiyacı olanın seçimi. Eğer eşit kaynak kullanımı olan etkinlikler varsa, maksimum süreye sahip olan etkinliğin mod'u seçilir.

Mod'un isteğe bağlı olarak seçilmesi: Tüm etkinlikler, mod 1 seçimine göre yapılırsa, mod 2 seçiminde tüm etkinlikler mode 2'de, mod 3 seçiminde tüm etkinlikler mod 3'te yapılmalıdır. Eğer seçilen modda bir etkinlik icra edilemiyorsa etkinliğin diğer modlarından minimum süre ve minimum kaynak kullanımlı etkinliklerin olduğu mod seçilir.

Minimum kaynak talebi olan modun seçimi: Bir etkinliğin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarının toplamı ile etkinliğin süresinin çarpımı sonucu oluşan değer minimum olan mod seçimi yapılır.

Maksimum kaynak talebi olan modun seçimi: Bir etkinliğin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarının toplamı ile etkinlik süresinin çarpımı sonucu oluşan değer maksimum olan mod seçimi yapılır.

Adım 2. Kaynakların yeterlilik durumu kontrol edilir.

Yenilenebilir kaynaklar için R1 ve R2 maksimum kaynak miktarı, r1 ve r2 ise etkinlikte kullanılan kaynak miktarlarıdır. Yenilenemeyen kaynaklar için NR1 ve NR2 maksimum kaynak miktarı, nr1 ve nr2 ise etkinlikte kullanılan kaynaklar miktarlarıdır.

Çizelge 2. Örnek problemin modları

MOD 1				MOD 2				MOD 3			
R1	R2	NR1	NR2	R1	R2	NR1	NR2	R1	R2	NR1	NR2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	6	0	6	0	6	0	5	0	6	0
0	1	0	9	7	0	0	8	0	1	9	0
4	0	8	0	3	0	8	0	3	0	0	5
0	6	8	0	0	5	0	4	0	4	8	0
0	3	0	6	6	0	6	0	5	0	2	0
5	0	8	0	3	0	6	0	0	4	6	0
6	0	0	6	0	8	2	0	1	0	0	5
7	0	0	10	0	7	0	9	0	5	0	4
0	9	0	5	9	0	4	0	0	8	2	0
9	0	8	0	0	10	0	7	9	0	0	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge 3. Minimum Etkinlik Süreli Mod Seçimi

Etkinlikler	Mod 1 Süreler	Mod 2 Süreler	Mod 3 Süreler	Seçilen Mod	Seçilen Süre
1	0	0	0	1	0
2	4	7	8	1	4
3	6	7	9	1	6
4	4	5	9	1	4
5	7	7	8	2	7
6	7	8	9	1	7
7	2	8	8	1	2
8	4	7	10	1	4
9	2	2	8	2	2
10	5	5	10	2	5
11	5	5	10	1	5
12	0	0	0	1	0

Etkinlikler 3 mod içerisinde birisiyle yapılmalı, bu sebeple de en az 1 mod için yeterli kaynak mevcut olmalıdır. Eğer hiçbir modda etkinliği yapmak için yeterli kaynak yok ise, o proje tamamlanamayacaktır. Bazı etkinlikler 3 moddan sadece birisiyle veya ikisiyle yapılabilir. Bu durumda geçerli mod, uygun olan modlarla yapılmalı yeterli kaynak miktarı olmayan modun veya modların seçimi yapılmamalıdır. Geliştirilen programda eğer yenilenemeyen kaynaktan yeterli miktarı olmayan mod seçilmiş ise yeterli kaynak olmadığı rapor edilir. R1 maksimum kaynak miktarı, farklı modlarda gereken r1 tipi kaynak kullanımına eşit veya daha büyük olmalıdır, aksi halde etkinlik o modda yapılamaz. R2 için de her bir etkinliğin modlarında kaynak kullanımları kontrol edilmelidir. Bir etkinliğin seçilen mod için kullanılabilir NR1 ve NR2 miktarları, her bir etkinliğin nr1 ve nr2 toplamlarından az olmamalıdır.

Adım 3. Seçilen mod'a göre öncelikle deterministik KYM / BKYM işletilir. Her bir mod değişiminde etkinlik süreleri de değiştiği için, KYM/BKYM'yi her defasında hesaplatmak gerekir. Uygun mod seçimi yapıldıktan sonra, KYM/BKYM yöntemi ile şebeke yapısı ve öncelik ilişkileri esasına göre etkinliklerin deterministik ve bulanık ortamda EST/FEST (En erken başlama zamanı), LST/FLST (En geç başlama zamanı), EFT/FEFT (En erken tamamlanma zamanı), LFT/FLFT (En geç tamamlanma zamanı) ve aylak süreleri hesaplanır. Kritik etkinlikler ve kritik olmayan etkinlikler tanımlanır. Proje kaynak ihtiyaçları dikkate alınmadan çizelgelenir ve KYM/BKYM'ye göre en küçük proje tamamlanma sırası ve süresi bulunur (Çizelge 4).

Çizelge 4. Minimum etkinlik süreli mod seçimine göre KYM sonuçları

Etkinlik No	Seçilen Mod	Süreler	EST	ECT	LST	LCT	Min Slack
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	4	0	4	13	17	13
3	1	6	0	6	0	6	0
4	1	4	0	4	2	6	2
5	2	7	6	13	6	13	0
6	1	7	6	13	6	13	0
7	1	2	4	6	18	20	14
8	1	4	13	17	13	17	0
9	2	2	17	19	20	22	3
10	2	5	13	18	17	22	4
11	1	5	17	22	17	22	0
12	1	0	22	22	22	22	0

Adım 4. Başlangıç çözümün bulunması: Başlangıç çözümü, sezgisel bir kural kullanılarak belirlenebilir. Örneğin ROT ve MinSlack kurallarından birisi seçilir. Elde edilen çizelge sırası, tabu algoritması için başlangıç çözümü olarak seçilir. Şimdiye kadar bulunan en iyi sıralama (Sb), uygulanabilir ardışıklık Si olarak seçilir (Çizelge 5).

Adım 5. Tabu aramasında kullanılan değişkenlere değer atanır. Tabu listesi genişliği için değer belirlenir. Örnek için, $\sqrt{n-2} = \sqrt{12-2} \cong 3$ olarak belirlenir. Durdurma kriteri olarak, maksimum iterasyon sayısı için değer belirlenir.

Adım 6. Tabu Arama (TA) prosedürü işletilir.

Çizelge 5. Minimum Etkinlik Süreli Mod Seçimine göre MinSlack Sonuçları

j	1	3	5	6	8	11	12	4	9	10	2	7
MinSlack	0	0	0	0	0	0	0	2	3	4	13	14
Süreler	0	6	7	7	4	5	0	4	2	5	4	2
Kaynak	0 0 0 0	0 1 0 9	0 5 0 4	0 3 0 6	6 0 0 6	9 0 8 0	0 0 0 0	4 0 8 0	0 7 0 9	9 0 4 0	9 0 6 0	5 0 8 0
EST	0	0	6	6	13	17	22	0	17	13	0	4
Tstart	0	0	6	13	20	24	34	0	24	29	4	8
Tson=Süre+Tstart	0	6	13	20	24	29	34	4	26	34	8	10
TNow	0	0	4	6	8	10	13	20	24	26	29	34
Kaynak Düzeyi	9 7 59 52	9 7 59 52	9 6 51 43	0 7 45 43	9 2 45 39	9 2 37 39	9 7 37 39	9 7 37 33	9 7 37 27	0 7 29 18	9 7 29 18	9 7 25 18
Kaynak Kullanımı	0 0 0 0	9 6 59 43	0 6 45 43	0 2 45 39	4 2 37 39		9 4 37 33	3 7 37 27	0 7 29 27		0 7 25 18	
Kaynak Kullanımı		5 6 41 43							0 0 29 18			
Aday Liste	1	3,4,2	2,7	5,6,7	6,7	6	6	8,10	11,9,10	10	10	12
Çizelgelenen Etkinlikler	1	3,4	2	5	7	-	6	8	11,9	-	10	12
İterasyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Adım 7. Durdurucu ölçütler, denetlenir. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşılmadıysa, Adım 6'ya gidilir. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığı anda, şimdiye kadar bulunan en iyi çözüm, sonuç çözümü olarak rapor edilir.

Adım 8. Toplam proje maliyeti bulunur. Son olarak, her bir kaynak tipi için brüt birim maliyeti belirlenir. Kaç kaynak tipi varsa, o kadar değer girilmelidir. Daha sonra girilen maliyetlerle projenin toplam tamamlanma maliyeti ve proje tamamlanma zamanı hesaplanarak, bulunan sonuçlar rapor edilir. Bir etkinliğin toplam proje maliyeti, seçilen modda (etkinliğin süresi × kaynak kullanım miktarı × birim brüt kaynak kullanım maliyeti) çarpımı ile hesaplanarak ve tüm etkinliklerin maliyetleri toplanarak bulunacaktır. Mod değişiminden kaynaklanan toplam proje maliyetlerinin değişimi görülebilir (birim brüt kaynak kullanım maliyeti: 1 PB'dir).

Adım 9. Adım 1'e dönülür. Her bir mod seçim kuralı için belirtilen algoritma tekrar edilmelidir. Böylece minimum proje tamamlanma süresi ve toplam proje maliyeti bulunarak en uygun çözüm belirlenmelidir.

Tabu arama algoritmasının izlediği yol, önemli ölçüde başlangıç çözümüne bağlıdır. Dolayısıyla, Tabu arama algoritması kullanarak belirlenen çözüm

de yine başlangıç çözümüyle ilişkilidir. Daha iyi bir çözüm elde etmek için farklı başlangıç çözümleri ile yukarıda açıklanan süreç tekrarlanabilir. Sezgisel yöntemlerle en iyi çözümün sağlanıp sağlanmadığı, bir karşılaştırma yapılmadığı sürece kesin olarak bilinemez. Ancak, bir sezgisel yöntemin etkinliği hakkında şu genel yargı geçerlidir: İyi bir sezgisel yöntem, büyük bir olasılıkla her zaman en iyiye yakın veya önceden tespit edilmiş değerlendirme ölçütlerine göre yeterli sayılabilecek çözümleri sağlayan yöntemdir. Bu nedenle optimizasyon yöntemlerinin, en iyi çözümün sağlanması amacıyla geliştirilmesine karşın, sezgisel yaklaşımda amaç, "etkinlik ve güvenilirliği yüksek olan çözüm stratejisinin" geliştirilmesidir.

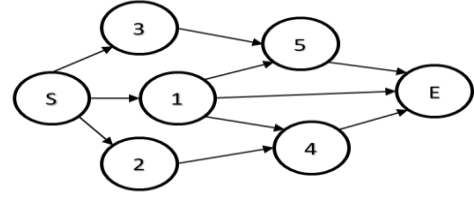
3.2 BÇM-KKPC için Sayısal Örnek

Bu bölümde kaynak kısıtları altında çok modlu proje çizelgeleme problemi ve deterministik, bulanık sayılar tarafından modellenen etkinliklerin belirsiz zaman parametreleri proje çizelgeleme maliyeti ile birlikte çok amaçlı olarak çözüm prosedürü sunulmuştur. Birinci aşamada, Tabu arama metasezgisel prosedürü, Hapke (2000) tarafından geliştirilen zayıf kıyaslama kuralı (WCR) baskın olmayan çizelgelerin kümesinin temsil edildiği bir örnek üretmede kullanılmıştır. Uygun çözümler, bulanık zaman parametreleri kullanmak amacıyla MinSlack ve ROT sezgisellerini genelleştirmek için

kullanılan yapıdadır. Bu, genelleştirilen bulanık sayılar üzerine bazı aritmetik işlemlerin ve bulanık sayılar için özel sıralama kurallarının kullanımıyla ilgilidir. Özellikle de WCR baskın olmayan çizelgelerin tasarımı, önerilen kıyaslama kurallarından biri kullanılarak tanımlanmıştır. Etkileşimli prosedür WCR baskın olmayan çizelgelerin örnekleri üzerine bulanık amaçlara arasındaki rekabetin en iyi uzlaşmayı belirleyen çizelgeyi aramak için organize edilmiştir. Bunu mümkün kılmak için, bir başarımlı büyüklüğü olan fonksiyon bulanık amaç uzayı genişletir. Bu yaklaşım, hipotetik sanal bir yazılım proje çizelgeleme problemine uygulanmıştır. Sunulan metodoloji, her yönüyle geneldir ve herhangi bir bulanık çok amaçlı kombinatorial optimizasyon problemini çözmek için uygulanabilir.

Bir ÇM-KKPC modelinde, öncelik ilişkileri olan $i=1, \dots, e, \dots, l$ etkinliklerinden oluşan tek bir proje olduğu düşünülür ve (e, i) etkinlikleri arasında e, i etkinliğin öncülü olacak şekilde düzenlenmiştir. Her bir i etkinliği m_j modundan birisiyle icra edilmelidir. Her bir etkinlik mod kombinasyonu sabit bir etkinlik süresine ve R tipi yenilenebilir kaynak tipinden bir veya daha fazla sabit bir miktara gereksinim duyularak icra edilir

Çizelge 6'da Şekil 3'te şebeke diyagramı verilen BÇM-KKPC modeli için veri kümesi sunulmuştur. Başlangıç ve bitiş yapay etkinliklerinden oluşan 7 etkinlikten oluşmuştur. Modlar, etkinlik süreleri kıyaslama yapılabilmesi amacıyla klasik etkinlik süreleri, klasik etkinlik sürelerinin tekrarlanması ve uyarlanan bağımsız yamuk bulanık sayılardan oluşan etkinlik süreleri a, b ve c olmak üzere üç grupta temsil edilmiş, üç tip kaynak kullanımı (işgücü, maliyet, malzeme) ve her bir etkinliğin ardılı faaliyeti çizelgede sunulmuştur. Bu verileri kullanarak ve öncelikler gereği oluşturulan proje şebekesi Şekil 3'te verilmiş olup problemin çözümleri takip eden Çizelge 6-11'de sunulmuştur.



Şekil 3: Bir ÇM-KKPC modelinin şebeke diyagramı

Çizelge 6. BÇM-KKPC modelinin örnek veri kümesi

Faaliyetler	Modlar	Klasik faaliyet süreleri	Tekrarlı bulanık faaliyet süreleri	Rassal bulanık faaliyet süreleri
S	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	1	12	(12,12,12,12)	(12,14,14,16)
	2	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,17)
	3	18	(18,18,18,18)	(18,19,19,20)
2	1	5	(5,5,5,5)	(5,6,6,7)
	2	11	(11,11,11,11)	(11,12,12,13)
	3	13	(13,13,13,13)	(13,14,15,16)
3	1	5	(5,5,5,5)	(5,7,7,8)
	2	14	(14,14,14,14)	(14,15,15,16)
4	1	15	(15,15,15,15)	(15,16,17,18)
	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
5	3	8	(8,8,8,8)	(8,9,9,9)
	1	13	(13,13,13,13)	(13,14,14,15)
E	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
	3	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,18)
	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
Faaliyetler		R1	N1	N2
S		0	0	0
1		3	3	5
		2	4	4
		4	3	3
2		3	2	5
		4	5	2
		2	4	3
3		3	4	2
		2	5	4
4		4	2	3
		3	5	2
		2	4	3
5		3	5	3
		2	6	4
		3	2	3
E		0	0	0

Çizelge 7. Örnek proje B-KYM çözümü

No	Süre	FEST	FECT	FLST	FLCT	Min Slack
S	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)
2	(5,5,5,5)	(0,0,0,0)	(5,5,5,5)	(11,11,11,11)	(16,16,16,16)	(11,11,11,11)
3	(5,5,5,5)	(0,0,0,0)	(5,5,5,5)	(7,7,7,7)	(12,12,12,12)	(7,7,7,7)
4	(8,8,8,8)	(12,12,12,12)	(20,20,20,20)	(16,16,16,16)	(24,24,24,24)	(4,4,4,4)
5	(12,12,12,12)	(12,12,12,12)	(24,24,24,24)	(12,12,12,12)	(24,24,24,24)	(0,0,0,0)
E	(0,0,0,0)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	(0,0,0,0)
S	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	(12,14,14,16)	(0,0,0,0)	(12,14,14,16)	(0,0,0,0)	(10,14,14,18)	(0,0,0,0)
2	(5,6,6,7)	(0,0,0,0)	(5,6,6,7)	(8,12,12,17)	(15,18,18,22)	(8,12,12,17)
3	(5,7,7,8)	(0,0,0,0)	(5,7,7,8)	(2,7,7,13)	(10,14,14,18)	(2,7,7,13)
4	(8,9,9,9)	(12,14,14,16)	(20,23,23,25)	(15,18,18,22)	(24,27,27,30)	(4,4,4,4)
5	(12,13,13,13)	(12,14,14,16)	(24,27,27,30)	(10,14,14,15)	(24,27,27,30)	(0,0,0,0)
E	(0,0,0,0)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(0,0,0,0)

Çizelge 8. Örnek proje MinDur kuralına göre MinSlack çözümü

No	Süre	Başlangıç zamanı	Bitiş zamanı	Öncelleri	Kaynak kullanımı	Kalan kaynak miktarı
0	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	-	0 0 0	8 25 21
1	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)	(12,12,12,12)	0	3 3 5	5 22 16
3	(5,5,5,5)	(0,0,0,0)	(5,5,5,5)	0	3 4 2	2 18 14
2	(5,5,5,5)	(5,5,5,5)	(10,10,10,10)	0	3 2 5	2 16 9
5	(12,12,12,12)	(12,12,12,12)	(24,24,24,24)	1	2 6 4	6 10 5
4	(8,8,8,8)	(12,12,12,12)	(20,20,20,20)	1	2 4 3	4 6 2
6	(0,0,0,0)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	5	0 0 0	8 6 2
0	0	0	0	-	0 0 0	8 25 21
1	12	0	12	0	3 3 5	5 22 16
3	5	0	5	0	3 4 2	2 18 14
2	5	5	10	0	3 2 5	2 16 9
5	12	12	24	1	2 6 4	6 10 5
4	8	12	20	1	2 4 3	4 6 2
6	0	24	24	5	0 0 0	8 6 2
0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	-	0 0 0	8 25 21
1	(12,14,14,16)	(0,0,0,0)	(12,14,14,16)	0	3 3 5	5 22 16
3	(5,7,7,8)	(0,0,0,0)	(5,7,7,8)	0	3 4 2	2 18 14
2	(5,6,6,7)	(5,7,7,8)	(10,13,13,15)	0	3 2 5	2 16 9
5	(12,13,13,14)	(12,14,14,16)	(24,27,27,30)	1	2 6 4	6 10 5
4	(8,9,9,9)	(12,14,14,16)	(20,23,23,25)	1	2 4 3	4 6 2
6	(0,0,0,0)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	5	0 0 0	8 6 2

Çizelge 9. Örnek proje Min/Maks kaynak talebi kuralına göre mod seçimi

Faaliyet	Mod	Klasik faaliyet süresi	Tekrarlı bulanık faaliyet süresi	Rassal bulanık faaliyet süresi
5	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	1	12	(12,12,12,12)	(12,14,14,16)
	2	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,17)
	3	18	(18,18,18,18)	(18,19,19,20)
2	1	5	(5,5,5,5)	(5,6,6,7)
	2	11	(11,11,11,11)	(11,12,12,13)
	3	13	(13,13,13,13)	(13,14,15,16)
3	1	5	(5,5,5,5)	(5,7,7,8)
	2	14	(14,14,14,14)	(14,15,15,16)
4	1	15	(15,15,15,15)	(15,16,17,18)
	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
	3	8	(8,8,8,8)	(8,9,9,9)
5	1	13	(13,13,13,13)	(13,14,14,15)
	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
	3	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,18)
E	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
Kaynak talebi	Bulanık kaynak talebi	En fazla kaynak talebi	En az kaynak talebi	
5	0	(0,0,0,0)	1	1
1	132	(132,154,154,17)		1
	150	(150,160,160,170)		
	180	(180,190,190,200)	3	
2	50	(50,60,60,70)		1
	121	(121,132,132,143)	2	
	117	(117,126,135,144)		
3	45	(45,63,63,72)		1
	154	(154,165,165,176)	2	
4	135	(135,144,153,162)	1	
	120	(120,130,130,140)		
	72	(72,81,81,81)		3
5	143	(143,154,154,165)		
	144	(144,156,156,168)	2	
	120	(120,128,128,144)		3
E	0	(0,0,0,0)	1	1

Çizelge 10. Örnek Proje Mod Seçim Kuralları

Mode Selection Rule	Aktivite					Proje çizelgeleme maliyetleri				Durulaştırma	
	S	1	2	3	4	5	E	643	690		699
Random	1	3	3	2	3	3	1	643	690	699	745
Min_dur	1	1	1	1	3	2	1	443	514	514	567
Max_dur	1	3	3	2	1	3	1	706	753	771	826
Min_Res_Type 1	1	2	3	2	3	2	1	637	688	697	739
Max_Res_Type 1	1	3	2	1	1	1	1	624	683	692	742
Min_Res_Dem	1	1	1	1	3	3	1	419	486	486	543
Max_Res_Dem	1	3	2	2	1	2	1	734	787	796	849
1	1	1	1	1	1	1	1	505	575	584	645
2	1	2	2	2	2	2	1	689	743	743	797
3	1	3	3	1	3	3	1	534	588	597	641
Min_Res_Type 2	1	1	1	1	1	3	1	482	549	558	624
Max_Res_Type 2	1	2	2	2	2	1	689	743	743	797	
Min_Res_Type 3	1	3	2	1	2	1	1	609	669	669	720
Max_Res_Type 3	1	1	1	2	1	2	1	615	679	688	752

Çizelge 11'deki sonuçlar değerlendirildiğinde, MinSlack ve ROT başlangıç sezgiselleri, Kaynak ve Mod seçimi için Minimum etkinlik süresine sahip olarak işletilen modelin Tabu arama sonucu optimal proje tamamlanma süresi 24, 27, 27 ve 30 olarak ve çizelge maliyeti 443, 514, 514 ve 567 olarak hesaplanmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada projelerin kaynak kısıtları altında çizelgelenmesi problemi incelenmiş ve problemin çözümü için yeni ve etkin çözüm yöntemlerinin tanıtılması ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Optimal çözümü sağlayan modeller incelenerek ne derece uygulanabilir olduğunu araştırılmış ve sonucunda örnek problemler yardımıyla uygulama zorluklarını ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntem bazı sezgisel öncelik kuralı esasına göre oluşturulan çözümler, başlangıç çözüm olarak kabul edilmiş ve alternatif olabilecek Tabu arama algoritması sınanmıştır.

Geliştirilen algoritma ve Proje Çizelgeleme Programı'nın performansını ölçmek ve değerlendirmek amacıyla, her bir veri kümesinin ortalamadan sapması ve optimal sonuç bulunan değerlerin yüzdesi hesaplanarak, literatürde yayınlanmış olan diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan ve literatürde yer alan veri kümelerine ait elde edilen özet sonuçlar Çizelge 12'de verilmiştir. PSLib kütüphanesinde yer alan ve yapay etkinlik içermeyen J10, J12, J14, J16, J18, J20 ve J30.MM ÇM-KKÇP'leri üzerinde test edilerek programın performansı değerlendirilmiştir. Yapay etkinlikler sadece 1 moddan oluşmakta olup, etkinlik süreleri ve kaynak kullanım miktarları 0'dır. Veri kümelerinde ait veri kümesi adı, problem tipi, etkinlik sayıları, kaynak sayıları, kaynak tipleri ve toplam test problemlerinin sayısından oluşmaktadır. 1'den 10'a kadar m_j modundaki j etkinlik süreleri birbirinde farklıdır. Kaynak listesi, iki yenilenebilir ve iki yenilenemeyen kaynaktan oluşmaktadır. Bir veri kümesinde toplam 640 test problemi bulunmakta olup, Çizelge 12'de veri kümelerine ait çözülebilen (olurlu çözümleri olan)

Çizelge 11. Bulanık ÇM-KKPC Probleminin Çözümü

Faaliyet Sayısı : 7	Kaynak Türü : 3				Kaynak Miktarı (8,25,21)	Proje Kompleksliği (1,428)	Proje Risk İndeksi (0,53)						
Çizelge Maliyeti	CPM	Min Slack	ROT	Min Slack	Tabu(ROT)	Mod Seçim Kuralı							
(643,690,699,745)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	Random	0->1	1->3	2->3	3->2	4->3	5->3	6->1
(443,514,514,567)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	MinDur	0->1	1->1	2->1	3->1	4->3	5->2	6->1
(706,753,771,826)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	MaxDur	0->1	1->3	2->3	3->2	4->1	5->3	6->1
(637,688,697,739)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	MinResUseageR1	0->1	1->2	2->3	3->2	4->3	5->2	6->1
(624,683,692,742)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(31,35,36,39)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	MaxResUseageR1	0->1	1->3	2->2	3->1	4->1	5->1	6->1
(419,486,486,543)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	MinResDem	0->1	1->1	2->1	3->1	4->3	5->3	6->1
(734,787,796,849)	(33,35,36,38)	(37,40,40,43)	(40,43,44,47)	(37,40,40,43)	(40,43,44,47)	MaxResDem	0->1	1->3	2->2	3->2	4->1	5->2	6->1
(505,575,584,645)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	Mod 1	0->1	1->1	2->1	3->1	4->1	5->1	6->1
(689,743,743,797)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	Mod 2	0->1	1->2	2->2	3->2	4->2	5->2	6->1
(534,588,597,641)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	Mod 3	0->1	1->3	2->3	3->2	4->3	5->3	6->1
(482,549,558,624)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	MinResUseageN1	0->1	1->1	2->1	3->1	4->1	5->3	6->1
(689,743,743,797)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	MaxResUseageN1	0->1	1->2	2->2	3->2	4->2	5->2	6->1
(609,669,669,720)	(31,33,33,35)	(29,33,33,36)	(29,33,33,36)	(31,33,33,35)	(29,33,33,36)	MinResUseageN2	0->1	1->3	2->2	3->1	4->2	5->1	6->1

Çizelge 12. Kıyaslama Tablosu

Önerilen Yöntem			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,05	95,3
12	547	0,03	96,6
14	551	0,03	96,58
16	550	0,03	96,67
18	552	0,03	96,74
20	554	0,03	96,66
Tavlama Benzetimi			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,21	96,30
12	547	0,19	91,20
14	551	0,92	82,60
16	550	1,43	72,80
18	552	1,85	69,40
20	554	2,10	66,90
Kuş Sürüsü Optimizasyonu			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,21	96,30
12	547	0,19	91,20
14	551	0,92	82,60
16	550	1,43	72,80
18	552	1,85	69,40
20	554	2,10	66,90
Genetik Algoritma			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,09	99,30
12	547	0,29	99,30
14	551	0,63	97,60
16	550	0,83	96,38
18	552	1,58	94,43
20	554	1,91	92,75

problem sayıları gösterilmiştir. Bu makale kapsamında önerilen tabu algoritma ve geliştirilen “Proje çizelgeleme” programı ile ÇM-KKPC problemleri tekrar çözülmüştür. (Bouleimen and Lecocq, 2003)’ün tavlama benzetimi yöntemi, (Jarboui vd. 2008)’nin kuş sürüsü optimizasyon yöntemi ve (Weglarz, 1980)’in dağıtık genetik algoritma yöntemiyle buldukları sonuçlarla bu çalışmada önerilen Tabu Arama (TA) Yöntemiyle bulunan sonuçlar kıyaslanarak Çizelge 12’de gösterilmiştir.

Önerilen yöntem, BÇM-KKPC problemlerinin çözümü için öncelik ilişkilerine dayalı olarak başlangıç çözümü üretmekte ve tabu metasezgisel algoritmasını kullanarak proje tamamlanma süreselerini minimize ederek optimal sonuca ulaşmaktadır. Literatürdeki diğer yöntemler ile kıyaslandığında, Çizelge 12’de belirtildiği gibi elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin daha kısa sürede daha iyi sonuçlar verdiği bulgusu elde edilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan B-ÇM-KKPC problemi ile ilgili olarak bundan sonraki dönemde yapılabilecek çalışmalar üç alanda toplanmaktadır. Bu alanlardan birincisi, ele alınan proje ağında mevcut bulunan belirsizliklerin modellenmesinde kullanılacak yöntemle ilgili yapılabilecek çalışmaları kapsamaktadır. İkinci alandaki çalışmalar matematiksel modelin kapsamının genişletilmesini konu olabilecektir. Çalışma yapılabilecek üçüncü alan ise oluşturulacak matematiksel modelin çözüm yönteminin geliştirilmesi alanıdır.

Çalışma yapılabilecek birinci konu matematiksel modele dahil edilen proje faaliyetlerindeki belirsizliklerin modellenmesinde uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının belirlenmesidir. Proje uzmanlarından alınan bilginin modellenmesinde kayıp yaşanmaması ve aynı zamanda model sonuçlarında iyi sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının araştırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde ele alınan projede kullanılacak faaliyetlerin özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Oluşturulan matematiksel modelin kapsamını genişletmek üzere yapılacak çalışmalar ikinci alanı oluşturmaktadır. Modelde proje faaliyet sürelerinde mevcut bulunan belirsizliğin modellenmesi amacıyla bulanık dağılımlar kullanılmıştır. Modelin geliştirilmesi amacıyla kaynak kullanım maliyetlerindeki ve kaynak kullanım miktarlarındaki belirsizliklerin de bulanık dağılımlar kullanılarak modele dahil edilmesi mümkündür. Ayrıca, bu çalışmada ele alınan tek proje durumu genişletilerek çoklu proje durumu üzerinde çalışma yapılabilecektir.

Konu üzerinde çalışma yapılabilecek üçüncü alan ise çözüm yönteminin geliştirilmesi konusudur. Literatürde KKPÇ problemi hesaplama karmaşıklığı olan NP-zor bir problem türü olarak tanımlanmıştır. Problemin çözümünde kullanılan başlıca yöntemler arasında dal-sınır algoritmaları, sezgisel algoritmalar ve metasezgisel yöntemler yer almaktadır. Başlangıç çözümlerinin bulunması ve çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemleri problemin optimal veya optimale yakın çözülmesinde büyük önem taşımakta olup iyi başlangıç çözümlerinin bulunması ve aranacak çözüm uzayını iyi bir şekilde sınırlayan yöntemler üzerinde çalışma yapılabilecektir. Ayrıca, başlangıç çözümü bulunmuş ve çözüm uzayı sınırlandırılmış problemin çözümünde özellikle genetik algoritma, benzetilmiş tavlama, TA, kanguru algortması, oryantirik, arı kolonisi algoritması, kuş sürüsü algoritması, nöral network algortması, kurbağa zıplama algortması, renk algortması, demster shaffer algortması vb metasezgisel arama yöntemleri kullanılarak problemin çözülmesi üzerinde çalışmalar yapılması mümkündür.

5. Kaynaklar

- Atlı, Ö. and Kahraman, C. 2013. Fuzzy critical path analysis, *Sigma Journal of Engineering and Natural Science*, **31**, 128-140.
- Atlı, Ö. 2011. Tabu search and an exact algorithm for the solutions of resource-constrained project scheduling problems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, **2**, 255-267.
<https://doi.org/10.1080/18756891.2011.9727781>

- Arauj, J.S.S., Santos, H.G., Gendron, B., Dominik J.S., Brito, S.S. and Souza, D.S., 2020. Strong bounds for resource constrained project scheduling: Preprocessing and cutting planes. *Computers and Operations Research*, **113**, 104782.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104782>
- Birjandi A. and Mousavi S.M., 2019. Fuzzy resource-constrained project scheduling with multiple routes: A heuristic solution. *Automation in Construction*, **100**, 84-102.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.029>
- Bouleimen, K. and Lecocq, H. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource constrained project scheduling problem. Tech. rep., Service de Robotique et Automatisation, Universite de Liege, 1998.
- Bouleimen, K. and Lecocq, H., 2003. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version. *In European Journal of Operational Research*, **49(2)**, 268-281.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00761-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00761-0)
- Bofill, M., Coll,J., Suy, J. and Villaret, M. 2020. SMT encodings for Resource-Constrained Project Scheduling Problems. *Computers & Industrial Engineering*, **149**, 106777.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106777>
- Buckley, J. J., 1985. Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, **17(3)**, 233-247.
- Brucker,P., Drexl,A., Möhring, R. Neumann,K. and Pesch.E., 1999. Resources-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Model and Methods. *European Journal of Operational Research*, **112**,. 3-41.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00204-5)
- Chanas, S. and Kamburowski, J., 1981. The use of fuzzy variables in pert. *Fuzzy Sets and Systems*, **5(1)**, 11-19.
[https://doi.org/10.1016/0165-0114\(81\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(81)90030-0)
- Chen, S. P. and Hsueh, Y. J., 2008. A simple approach to fuzzy critical path analysis in project networks. *Applied Mathematical Modelling*, **32(7)**, 1289-1297.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.04.009>

- Drexl, A. and Gruenewald, J. 1993. Nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. *IIE transactions*, **25**(5), 74-81. <https://doi.org/10.1080/07408179308964317>
- Drexl, A., Nissen R., Patterson J. and Salewski F. 2000. PROGEN/ πX – An instance generator for resource-constrained project scheduling problems with partially renewable resources and further extensions. *European Journal of Operational Research*, **125**, 59-72. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00205-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00205-2)
- Dubois, D. and Prade, H., 1988. Possibility theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty. Computational Complexity. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_139
- Dubois, D. and Prade, H. 1983. Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory. *Information Sciences*, **30**(3), 183-224. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(83\)90025-7](https://doi.org/10.1016/0020-0255(83)90025-7)
- Elsayed, E. A., 1982. Algorithms for project scheduling with resource constraints. *International Journal of Production Research*, **20**(1), 95–103. <https://doi.org/10.1080/00207548208947751>
- Glover, F. 1990a. Tabu Search—Part II. *ORSA Journal on Computing*, **2**(1), 4-32. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2.1.4>
- Glover, F. 1990b. Tabu Search: A Tutorial. *Interfaces*, **20**(4), 74-94. <https://doi.org/10.1287/inte.20.4.74>
- Hapke, M., Jaszkiwicz, A., and Słowiński, R. 2000. Pareto simulated annealing for fuzzy multi-objective combinatorial optimization. *Journal of Heuristics*, **6**, 29–345. <https://doi.org/10.1023/A:1009678314795>
- Hartmann, S. and Drexl, A. 1998. Project scheduling with multiple modes: A comparison of exact algorithms. *Networks: An International Journal*, **32**(4), 283-297. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970037\(199812\)32:4<283::AID-NET5>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970037(199812)32:4<283::AID-NET5>3.0.CO;2-I)
- Jarboui, B., Damak, N., Siarry, P. and Rebai, A., 2008. A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*, **195**(1), 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.04.096>
- Kassandraa, T.R. and Suhartonob, D., 2018. Resource-Constrained Project Scheduling Problem using Firefly Algorithm. *Procedia Computer Science*, **135**, 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.206>
- Knyazevaa, M., Bozhenyuka, A. and Rozenbergb, I. 2015. Resource-constrained project scheduling approach under fuzzy Conditions. *Procedia Computer Science* **77**, 56 – 64. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.359>
- Kulejewski, J., Ibadov, N. and Krzemiński, M. 2018. Scheduling Construction Projects Under Fuzzy Modelling of Resource Constraints. *MATEC Web of Conferences*, **196**, 04045. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819604045>
- Kurt, P.A., 2018. Çok projeli kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi: bir yazılım firmasında uygulama çalışması (Yüksek lisans), Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 104.
- Mori, M. and Tseng, C.C., 1997. A genetic algorithm for multi mode resource constrained project scheduling problem. *European Journal of operational Research*. **100**, 134-141. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00180-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00180-4)
- Nasution, S. H., 1994. Fuzzy Critical Path Method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **24**(1), 48-57. <https://doi.org/10.1109/21.259685>
- Özdamar, L. and Ulusoy, G. 1995. A survey on the resource-constrained project scheduling problem. *IIE Transactions*, **27**: 574-586. <https://doi.org/10.1080/07408179508936773>
- Patterson, J. H., 1984. A Comparison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resource, *Project Scheduling Problem*. *Management Science*, **30**(7), 854-867. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.7.854>
- Pellerin, R., Perrier, N. and Berthaut, F., 2020. A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, **280**, 395–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.063>
- Rahman, H.F., Chakraborty, R.K. and Ryan, M.J., 2020. Memetic algorithm for solving resource constrained

project scheduling Problems. *Automation in Construction*, **111**, 103052.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103052>

İnternet kaynakları

1-<http://129.187.106.231/psplib/>

Sharma, K. and Trivedi, M. K., 2020 Latin hypercube sampling-based NSGA-III optimization model for multimode resource constrained time–cost–quality–safety trade-off in construction projects *International Journal of Construction Management* (online).
<https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1843769>

Talbot, F. B., 1982. Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: *The Nonpreemptive Case. Management Science*, **28**(10), 1197-1210.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.28.10.1197>

Wang, X., and Huang, W., 2010. Fuzzy resource-constrained project scheduling problem for software development. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, **15**(1), 25-30.
<https://doi.org/10.1007/s11859-010-0106-z>

Weglarz, J., 1980. On certain models of resource allocation, problems, *Kybernetes* 9, 61-66.

Yager, R. R., 1981. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval. *Information Sciences*, **24**(2), 143-161. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(81\)90017-7](https://doi.org/10.1016/0020-0255(81)90017-7)

Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, **8**(3), 338-353. <https://doi.org/10.1109/2.53>

Zaman, F., Elsayed, F., Sarker, R., Essam, D. 2020. Hybrid evolutionary algorithm for large-scale project scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, **146**, 106567.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106567>

Zaman, F., Elsayed, S., Sarker, R., Essam, D., Carlos A. Coello C. 2021. An evolutionary approach for resource constrained project scheduling with uncertain changes. *Computers and Operations Research*, **125**, 105104.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105104>

Zimmermann, H.-J., 2001. Fuzzy Relations and Fuzzy Graphs. In *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*, 321-367.
https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0_6

Taşınmaz Yönetiminde Arsa Rayiç Değerindeki Zamansal Değişimin Konumsal Analiz Teknikleri ile İncelenmesi

Arif Çağdaş AYDINOĞLU^{1,*}, Süleyman ŞİŞMAN², Yasemin YILMAZ³

^{1,2,3} Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

*Sorumlu Yazar, e-posta: aydinoglu@gtu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4912-9027>

ssisman@gtu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0924-1092>

yasemin.yilmaz2017@gtu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8565-0357>

Geliş Tarihi: 07.03.2021

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Sürdürülebilir arazi yönetimi için insan hayatının parçası olan taşınmazların etkin yönetimi, ekonomik ve sosyal açıdan önem arz eden alan olmuştur. Taşınmazın pazar fiyatı veya satış fiyatı olarak da ifade edilen değeri, arazi yönetimi uygulamalarında olduğu kadar vergilendirmede ve yatırım planlamasında da büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bölgesel farklılıkları daha iyi tespit edebilmek için İstanbul-Kocaeli sınırı bölgesi çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Taşınmaz yönetimi uygulamaları için arsa rayiç değerine bağlı mahalle-bazlı kümelemeler tespit edilmiş ve farklı yıllardaki zamansal olarak değişimin CBS tabanlı analizleri gerçekleştirilmiştir. Konumsal Otokorelasyon, Sıcak-konum Kümeleme Analizleri (Hot Spot) ve Kümeleme ve Aykırılık Analizleri (Cluster and Outlier) kullanılarak sonuç haritalar üretilmiştir. Arsa rayiç değerinin yıllara göre sürekli artış gösterdiği ve 2017 yılında bir sıçrama olduğu tespit edilmiştir. İstanbul-Kocaeli arasındaki geçişin, sosyo-ekonomik birçok faktör çerçevesinde olduğu ve bölgesel farklılıkların arsa rayiç değer dağılımına etkisini ortaya koyulmuştur. Böylelikle yerel yönetimler; kentsel gelişim politikaları ve uygulama imar planı değişiklikleri ile bölgesel farklılıkları azaltmada ve kentsel donatıların yer seçiminde, yüksek ve düşük değer kümelemesi olan mahalleler ve aykırı durumda belirlenen mahalle bilgilerinden yararlanabilir.

Anahtar kelimeler

CBS; Konumsal Otokorelasyon; Sıcak Konum Analizi; Kümeleme ve Aykırılık Analizi; Arsa Rayiç Değeri

Investigating the Temporal Change of Land Market Value By Spatial Analysis Techniques

Abstract

Effective management of the real estates, which is a part of human life for sustainable land management, has become an economically and socially important issue. The value of the real estate, which is also expressed as the market price or sales price, is of great importance in taxation and investment planning as well as in the land management applications. In this study, the Istanbul-Kocaeli city border region has been determined as the study area in order to better identify regional differences. For real estate management applications, neighborhood-based spatial clusters based on the current value of the land were detected and GIS-based analyzes have been carried out to determine the temporal change in different years. Result maps were produced using Spatial Autocorrelation, Hot-Spot Clustering Analysis, and Cluster and Outlier Analysis. It was detected that the current value of the land has continuously increased over the years and there was a boom in 2017. It has been revealed that the transition between Istanbul and Kocaeli cities is within the framework of many socio-economic factors and regional differences have an effect on the distribution of the land market value. In this way, local governments can benefit from neighborhoods with high and low value clusters and neighborhood information determined as outlier, both in reducing regional disparities with urban development policies and elementary development plan changes, and in the site selection of urban facilities.

Keywords

GIS; Spatial Autocorrelation; Hot Spot Analysis; Cluster and Outlier Analysis; Land Market Value

1. Giriş

Toprak, üretilemeyen kıt kaynaktır ve etkin yönetilememesi sonucu olarak giderek azalmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik, sosyal ve çevresel önceliklerin kesişimi olduğu düşünüldüğünde; Sürdürülebilir Arazi Yönetimi ilkesine dayanarak, toprağın en iyi biçimde kullanılması ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Kırsal alanlarda tarımsal üretimin artırılması hedeflenirken, kalabalıklaşan ve büyüyen şehir alanlarında yaşanabilirliği artırmak hedeflenmektedir. Gittikçe küçülen araziler, yerleşim yerlerindeki binalar ve bağımsız bölümlerin oluşturduğu taşınmazların yönetimi, insanın hayatının parçası olarak ekonomik ve sosyal açıdan önem arz eden alan olmuştur. Taşınmazın pazar fiyatı veya satış fiyatı olarak da ifade edilen değeri, arazi yönetimi uygulamalarında olduğu kadar ülke vergilendirmesinde de ekonomik anlamda büyük önem taşımaktadır. Taşınmaz değerlemesi ise objektif ve tarafsız bir şekilde, bir taşınmaza ilişkin nitelik, fayda, çevre, kullanım koşulları gibi faktörlerin irdelenmesi suretiyle söz konusu taşınmaz değerinin tespit edilmesidir (Bozdağ ve Ertunç 2020, Güngör 1999, Yalpir 2007, Yalpir ve Ünel 2016). Türkiye’de henüz belirli bir düzene oturmamış olsa da taşınmaz değerlemesinin gelişen teknoloji ile birlikte bilimsel bir tabana oturacağı öngörülmektedir.

Rayiç bedel; 1982 Anayasası, 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu ve 1319 sayılı Emlak Vergisi Kanunu’na göre piyasa değeri; devletleştirme, kamulaştırma veya emlak beyanının yapıldığı tarihte taşınmazın normal (alışılmış) alım ve satım bedelidir (Açlar ve Çağdaş 2002). Arsa Rayiç bedeli; valiliğini atadığı komisyonlar tarafından, semtteki emsal taşınmazlar dikkate alınarak güncel piyasa koşullarına göre, yer aldığı semt, çevresindeki sosyal imkanlar veya ulaşım olanakları dikkate alınarak belirlenir. Taşınmaz değerlemesi için de taşınmazın türüne göre uygun yöntemlerden birinin seçilerek taşınmazın o andaki rayiç bedelini belirlemek amaçlanmaktadır. Bu anlamda değerlemede kullanılan arsa rayiç değerinin (metrekare birim değeri) tespiti aşaması oldukça önem taşımaktadır. Günümüzde arsa birim değerlerinin gerçeğe uygun tespit edilememesi, ne yazık ki değerlendirme sektörüne

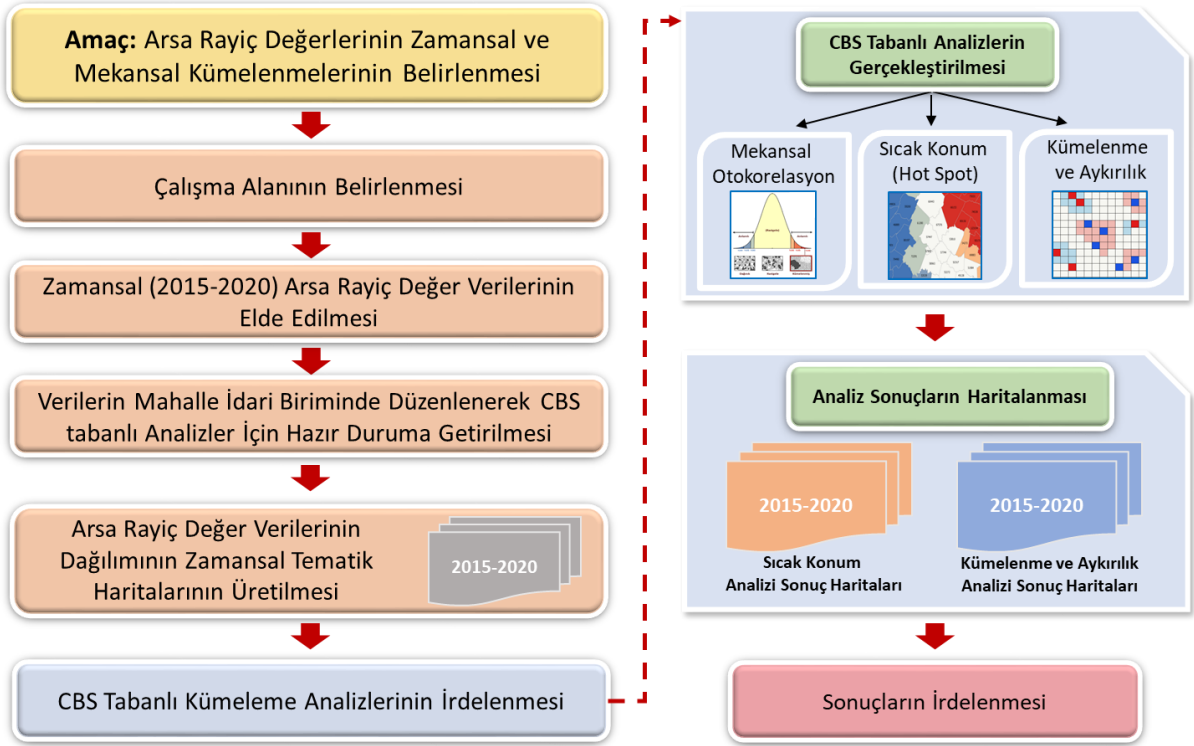
olumsuz şekilde yansımaktadır. Arsa takdir komisyonlarının arsa takdirlerinde parsel ölçeğine kadar inerek çalışmalarını yapması gerekmektedir (Töremen 2018).

Günümüzde belediye sınırları içerisindeki cadde ve sokaklara ait arsa rayiç değerleri, e-devlet üzerinden yıllara göre sorgulanabilmektedir. Farklı yıllarda değişim ve bölgesel farklılıklar olduğu gözlemlenmektedir. Hatta yakın mahallelerdeki sosyo-ekonomik farklılıklara bağlı olarak rayiç değerler çeşitlilik göstermektedir. Bu farklılık ve değişimin taşınmaz sektörüne yansımalarının ele alınması gereksinim haline gelmiştir.

Bu çalışmada, bölgesel farklılıkları daha iyi tespit edebilmek için İstanbul-Kocaeli sınırı bölgesi çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Pendik, Tuzla, Gebze, Darıca ve Çayırova ilçelerine ait mahallerde farklı yıllardaki arsa rayiç bedelleri analiz edilmektedir. Böylelikle taşınmaz yönetimi uygulamaları için arsa rayiç değerine bağlı mahalle bazlı kümelemeler tespit edilip, zamansal olarak değişimin CBS tabanlı analizler ile incelenmesi mümkün olacaktır.

2. Materyal ve Metot

Literatürde ve emlak sektörüne yönelik uygulamalarda, yatırım planlamasına yönelik birçok konut satış istatistik uygulaması ve değişim analizleri bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğunda taşınmazın veya idari birimin konumsal olarak yakınlığı, yoğunluğu veya kümelemesini dikkate alan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı uygulamalar yeterli düzeyde değildir. Ayrıca taşınmaz geliştirme uygulamaları için arsa rayiç değerinin zamansal ve konumsal değişimini doğrudan konumsal istatistik teknikleri ile irdelleyen çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, İstanbul-Kocaeli sınırındaki beş ilçede mahalle bazında arsa rayiç değerleri bakımından 2015-2020 yılları arasındaki değişiminin zamana ve konuma bağlı incelenmesi amaçlanmıştır. Şekil 1’de özetlenen uygulama iş akış sürecine uyumlu olarak, Konumsal Otokorelasyon, Sıcak-konum Kümeleme Analizleri (Hot Spot) ve Kümeleme ve Aykırılık Analizleri (Cluster and Outlier) kullanılarak mahalle bazlı incelemeler gerçekleştirilmek istenmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın iş akışı süreci

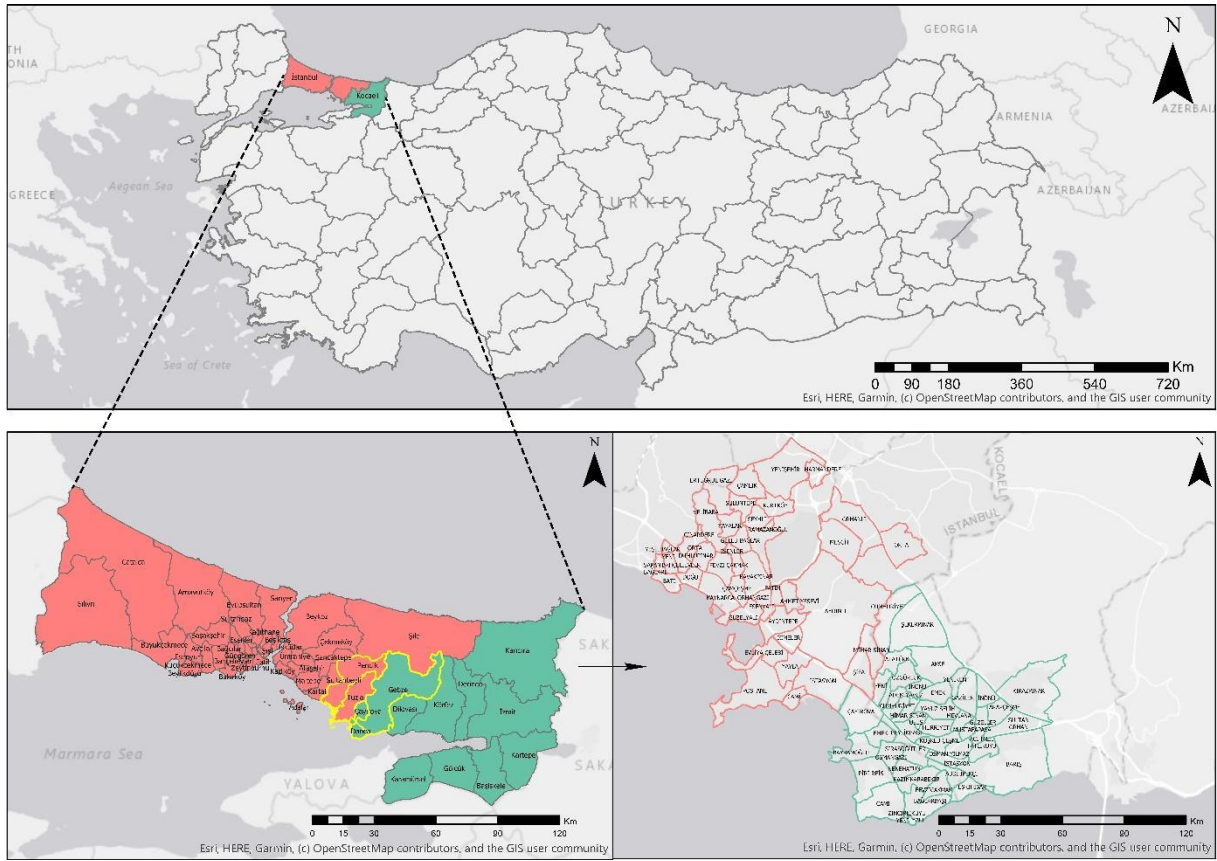
2.1 Çalışma Alanının Belirlenmesi ve Veri Setlerinin Hazırlanması

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de bölgelerarası gelişmişlik farklılıkları görülmektedir. Sosyo-ekonomik kaynakların dengeli dağılımının sağlanamaması ve planlı yatırım yapılamaması; ülke içinde bazı bölgelerin daha hızlı gelişmesine, konumsal farklılıkların ve kutuplaşmanın oluşmasına yol açmaktadır (Ersungur vd. 2007). Bu anlamda çalışma alanı belirlenmesinde temel amaç, bölgesel farklılıkların daha net tespit edilmesi ve irdelenmesidir.

İstanbul-Kocaeli il sınırındaki geçişi temsil edecek şekilde çalışma alanı belirlenmiştir. Kocaeli; 1.5 milyona ulaşan nüfusu, önemli sanayi tesisleri ve gelişmiş ekonomik yapısı ile Türkiye'nin büyük sanayi kentlerinden birisidir. Kocaeli'nin Türkiye'nin en büyük tüketim ve üretim merkezi olan İstanbul'a yakın olması, sanayi yatırımları için cazibe merkezi olmasını etkilemiştir (Bayraktutan vd. 2012). Başta Gebze olmak üzere Çayırova ve Darıca ilçeleri, kozmopolit yapısına rağmen en önemli sanayi tesislerine sahiptir. İstanbul'un Tuzla ilçesi ise

gelişmekte olan sınır ilçe özelliğinin yanı sıra, Tuzla-Gebze sınırı bölgesel farklılıkları barındırması ile doğru bir test alanı olarak kabul edilebilir. Pendik ilçesi ise yoğun yapılaşmış şehir merkezi ve yerleşim alanı olmasının yanı sıra, kırsal alanların bulunması ve tüm ulaşım olanaklarını barındırması ile yerel farklılıkların irdelenmesinde öne çıkan ilçedir. Bu sebepler göz önünde bulundurularak Pendik, Tuzla, Gebze, Çayırova ve Darıca'nın kapsadığı 5 ilçeden oluşan çalışma alanı belirlenmiştir (Şekil 2).

Çalışma alanına ait zamansal arsa rayiç değer verilerine Pendik (Int Kyn.1), Tuzla (Int Kyn.2), Gebze (Int Kyn.3) ve Darıca (Int Kyn.4) ilçeleri sınırları içerisinde bulunan mahallelere e-devlet platformu üzerinden, Çayırova ilçesi sınırlarındaki mahallelere ise Çayırova Belediyesi internet sitesinden (Int Kyn.5) erişilmiştir. 2015-2020 yılları arasındaki cadde bazındaki arsa rayiç verileri (metrekare birim değeri) mahalle bazına getirilerek toplamda 89 mahalle üzerinden 6 yıllık zamansal veri seti oluşturulmuştur. Tablo şeklindeki veri setinde gerekli düzenlemeler yapılarak CBS tabanlı analizler için hazırlanmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanının belirlenmesi

2.2 Konumsal Otokorelasyon

Global kümeleme istatistiklerinden biri olan konumsal otokorelasyon, ele alınan modelin kümelenmiş, dağınık veya rastgele olup olmadığını değerlendirir. Bu değerlendirmeyi yaparken Moran I indeksi değeri kullanılarak, Z Skoru ve P değeri hesaplanmaktadır (Şekil 3). Moran I, özelliklerin, konumu ve değerleri üzerinden mekânsal bağımlılıklarını ölçen bir tekniktir (Eyyuboğlu 2015, Requía and Roig 2015, Yalçın ve Kaya 2019).

Bu teknik ile değerlendirilen özelliğin ortalaması ve varyansı hesaplanarak, her özellik değeri için ortalamadan bir sapma üretilir. Tüm komşu unsurlar için sapma değerleri bir çapraz çarpım gerçekleştirir. Veri kümesindeki değerler konumsal olarak kümelenme eğilimindeyse Moran's I indeksi pozitif çıkacaktır. Yüksek değerler diğer yüksek değerleri ittiğinde ve düşük değerleri yakın olma eğiliminde olduğu zaman indeks negatif çıkacaktır. Bu pozitif ve negatif arası sonuç ürünler dengelenirse indeks sıfıra yakın olacaktır. Son olarak pay değeri varyansı ile normalleştirilerek, Moran's I indeksi değerleri -1 ile +1 arasında tanımlanacaktır. Moran's I indeksine ilişkin eşitlikler aşağıda gösterilmiştir (Int Kyn.6).

$$Moran's I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (2)$$

$w_{i,j}$: i ve j elemanları arasındaki konumsal ağırlık matrisi

z_i : Bir i verisi için ilgili değişkenin ortalamasından sapması ($x_i - \bar{X}$)

n : Toplam veri sayısı

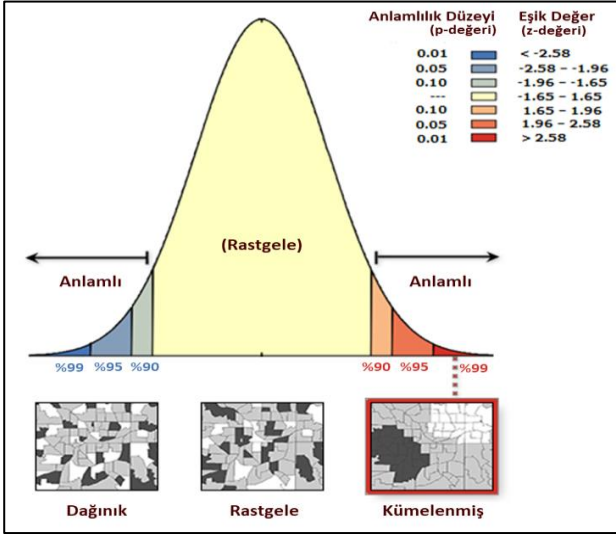
S_0 : Konumsal ağırlık matrisleri toplamını ifade etmektedir. Z skoru istatistiği (Z_I) ise aşağıdaki Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$Z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (3)$$

Eşitlikte, I : değerlendirmeye konu olan I indeks değerlerini, $E[I]$: I indeks değerlerinin ortalamasını ve $\sqrt{V[I]}$ ise I indeks değerlerinin standart sapmasını ifade etmektedir.

Konumsal otokorelasyon ile indeks değerleri hesaplanarak, gözlemlenen indeks değerleri ile karşılaştırılır. Bu farkın anlamlı olup olmadığını gösteren bir z-skoru ve bu skora karşılık gelen tablosal istatistik değeri olan p-olasılık değeri

üzerinden sonuçlar yorumlanır. Şekil 3'de p olasılık değeri ile z standart sapma puanı arasındaki anlamlılık düzeyi ifade edilir. Normal bir dağılım eğrisinin kuyruklarında çok küçük p değerleri ile çok yüksek veya çok düşük z değerleri bulunur. Bu da bize temsil edilen modelin rastgele olmadığını, ilişkiye göre de anlamlılık düzeyini ifade etmektedir.



Şekil 3. Konumsal otokorelasyon (Global Moran's I'e göre) p ve z değerine göre sonuçları (Int Kyn.7).

2.3 Sıcak-konum Kümeleme Analizleri (Hot Spot)

Kümelenme analizlerinin yerel tekniği Getis-Ord G_i^* , Genel G istatistiğinin yerel versiyonu olan bir konumsal istatistik yöntemidir (Lee and Wong, 2001). Getis-Ord G_i^* istatistiği, yüksek ya da düşük değerlerin kümelenmesinin anlamlı olup olmadığını da ortaya koymaktadır (Kervankıran ve Aktürk 2017, Yalçın 2020) ve veri kümesindeki her özellik için hesaplanmaktadır. Her bir özelliği konumsal olarak komşu özelliklere göre irdeler. Yüksek değere sahip bir özellik istatistiksel olarak önem arz etmeyebilir. İstatistiksel olarak önemli bir sıcak-konum kümelemesi için, bir özelliğin hem kendi değerinin yüksek olması, hem de yüksek değerli özellikleri ile çevrenmesi gerekmektedir. Anlamlı bir z-skoru elde edilmesi için, bir özelliğin ve komşularının yerel toplamı, tüm özelliklerin toplamıyla orantılı olacak şekilde karşılaştırılır. Bu sonuç, beklenen yerel toplamdan çok farklı ve bu fark rastgele oluşamayacak kadar büyük olmalıdır.

Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak her özellik için hesaplanan G_i^* istatistiği bir z-skorumu ifade etmektedir. İstatistiksel açıdan anlamlı pozitif z puanları için yüksek z puanı, yüksek konumsal kümelemeyi ve alandaki sıcak-konum kümelemesini (Hot-spot) belirler. İstatistiksel olarak anlamlı negatif z

puanları için küçük z puanı, düşük konumsal kümelemeyi ve alandaki soğuk-nokta kümelemesini (Cold-spot) belirler (Int Kyn.8).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{s \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{x})^2} \quad (5)$$

$w_{i,j}$: i ve j elemanları arasındaki konumsal ağırlık matrisi

x_j : j verisi için ilgili öznelik değeri

n : Toplam veri sayısı

2.4 Kümeleme ve Aykırılık Analizleri (Cluster and Outlier)

Diğer kümeleme testi olan Lokal Moran's I testi (Anselin, 1995), bölgedeki konumsal kümelemeler ya da konumsal aykırılıkların yerini tespit etmektedir, fakat bu kümelerin hangi değerlerden (pozitif-negatif) oluştuğu hakkında bilgi vermemektedir (Atalay, 2010). Lokal Moran's I testine ait eşitlikler aşağıda gösterilmiştir (Int Kyn.9).

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{X}) \quad (6)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{X})^2}{n-1} \quad (7)$$

$w_{i,j}$: i ve j elemanları arasındaki konumsal ağırlık matrisi

x_i : i verisi için ilgili öznelik değeri

\bar{X} : ilgili özneliğin ortalama değeri

n : Toplam veri sayısı

Burada I için pozitif bir sonuç, bir özelliğin benzer şekilde yüksek veya düşük öznelik değerlerine sahip komşu özelliklere sahip olduğunu gösterir ve bu özellik bir kümenin parçası olarak ifade edilir. Bu kümeler konumsal kümeler olup, yüksek-yüksek ve düşük-düşük olmak üzere iki şekilde incelenir. I için negatif bir sonuç ise, bir özelliğin farklı değerli komşu özelliklere sahip olduğunu gösterir ve bu özellik aykırı olarak ifade edilir. Bu konumsal aykırılık olup, yüksek-düşük ve düşük-yüksek olmak üzere iki şekilde incelenir.

3. Bulgular

3.1. Rayiç değer istatistikleri

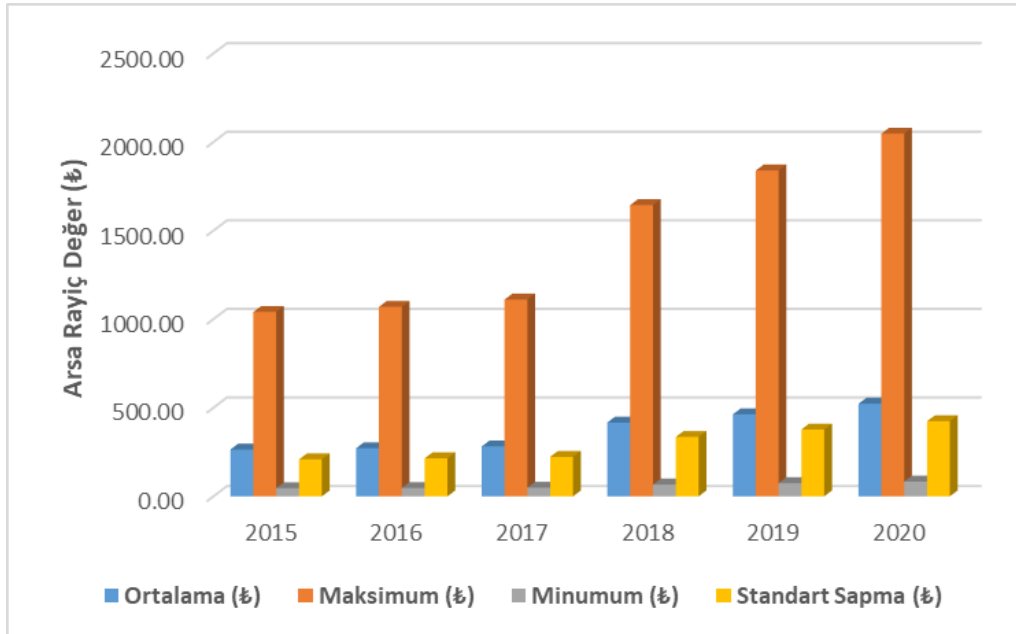
Çalışma kapsamında il olarak İstanbul ve Kocaeli illerinde bulunan toplam 89 mahalleye ilişkin arsa rayiç değer (metrekare birim değer) istatistikleri mahalle düzeyinde değerlendirilmiştir. Cadde bazında olan arsa rayiç değerleri ortalama alınmak suretiyle mahalle düzeyine indirgenmiş olup, her bir mahalle için tek bir arsa rayiç değeri elde edilmiştir. 2015-2020 yılları arasında 6 yıllık döneme ilişkin arsa rayiç değerlerinin ortalama, maksimum, minimum ve standart sapma gibi çeşitli istatistik bilgileri Çizelge 1’de verilmiştir. Tüm istatistiklerin artan yönde bir eğilim sergilediği görülmektedir (Şekil 4).

Ayrıca arsa rayiç değerlerinin yıllar arasındaki değişim miktarı ve bir önceki yıla göre değişim yüzdesi hesaplanarak Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2 incelendiğinde ise değişim miktarı ve yüzdesinin en az olduğu dönem 2015-2016 yılları arası iken, en fazla olduğu dönemin 2017-2018 yılları arası olduğu görülmektedir. Diğer taraftan tüm dönemlere ilişkin arsa rayiç değer değişim yüzdesi genel olarak pozitif yönde olmakla birlikte, 2017 yılından sonra değerlerde bir sıçrama tespit edilmiştir. 2018 yılından sonra ise değişim yüzdesinin daha durağan bir eğilim sergilediği belirlenmiştir (Şekil 5).

Çizelge 1. Mahalle düzeyinde ortalama arsa rayiç değerlere ilişkin çeşitli istatistik değerler (2015-2020).

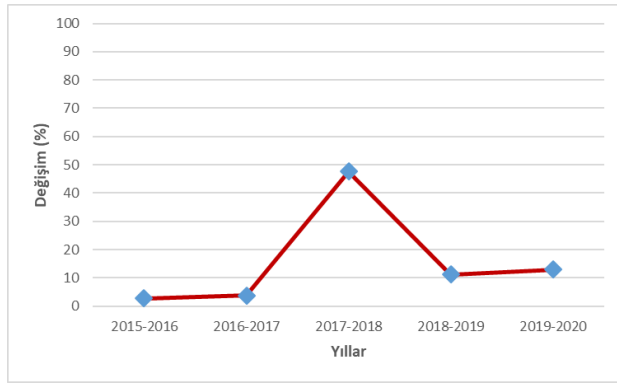
İstatistik Bilgiler/ Yıllar	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Ortalama (₺)	264,345	271,729	282,086	416,546	463,268	523,437
Maksimum(₺)	1040,934	1069,978	1110,958	1644,557	1839,683	2047,382
Minimum(₺)	45,986	47,267	49,074	66,953	74,895	83,352
Standart Sapma(₺)	208,957	214,800	223,031	335,610	377,258	424,581



Şekil 4. Mahalle düzeyinde ortalama arsa rayiç değerlere ilişkin çeşitli istatistik değerlerin grafiği (2015-2020)

Çizelge 2. Mahalle düzeyinde ortalama arsa rayiç değerlerin değişimi (2015-2020).

Yıllar	Değişim Miktarı (₺)	Yüzde Değişim (%)
2015-2016	7,384	+2,793
2016-2017	10,357	+3,812
2017-2018	134,459	+47,666
2018-2019	46,722	+11,217
2019-2020	60,168	+12,988



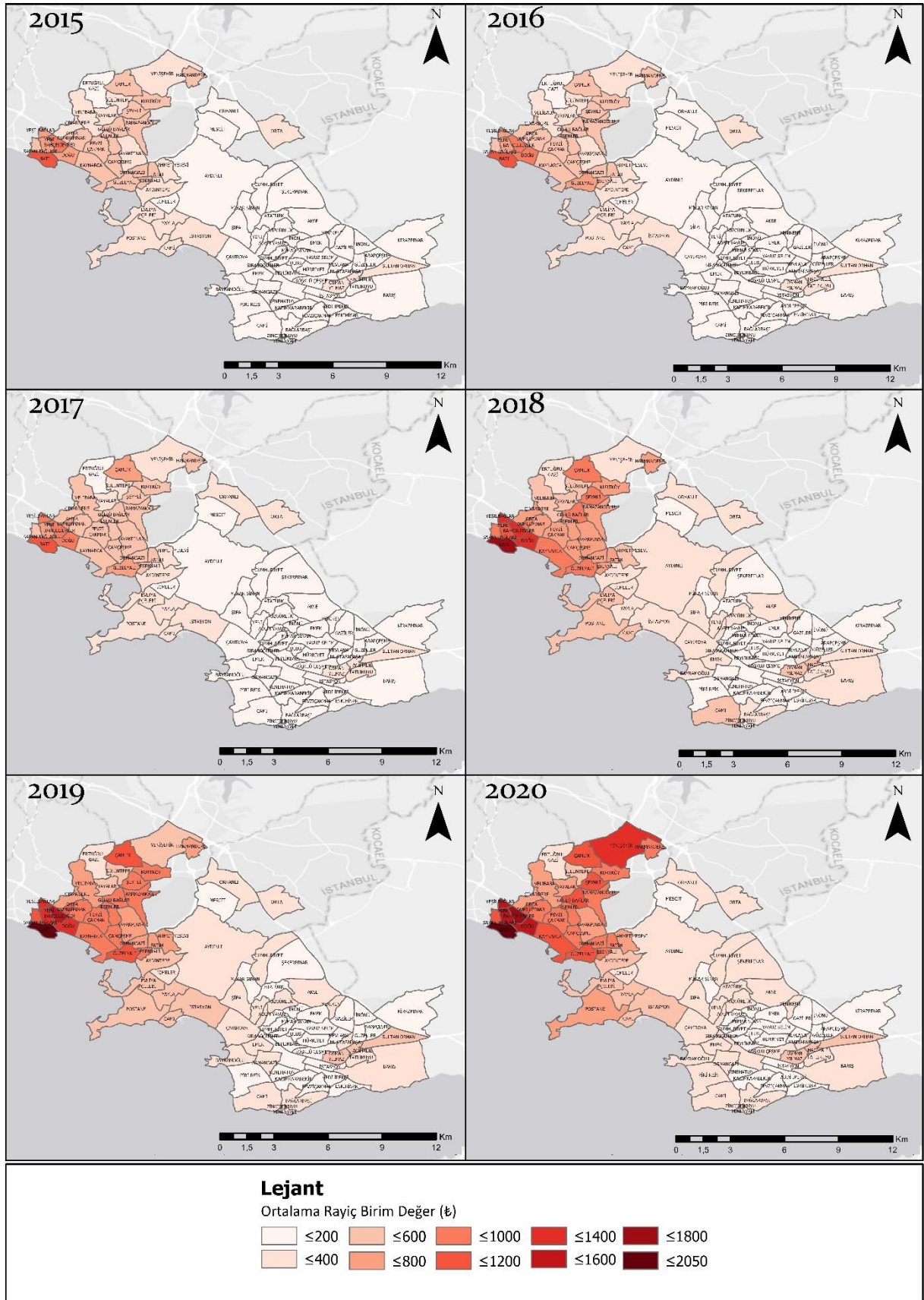
Şekil 5. Mahalle düzeyinde ortalama arsa rayiç değerlerin yüzdesel değişiminin grafiği (2015-2020).

3.2. Mahalle Bazında Rayiç Değer Analizleri

3.2.1 Mahalle Bazında Rayiç Değer Dağılımları

Arsa rayiç birim değerlerinin mahalle idari birim düzeyindeki dağılımları CBS ortamında analiz edilmiştir. Bu kapsamda arsa rayiç değerleri ile mahalleler ilişkilendirilerek, 89 mahalledeki 6 yıla ilişkin arsa rayiç değerlerini içeren bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti kullanılarak 2015-2020 yılları için üretilen tematik haritalar Şekil 6'da sunulmuştur.

Şekil 6'daki haritalarda ortalama arsa rayiç değerlerinin yüksek olduğu mahalleler koyu renk tonları ile düşük olduğu mahalleler ise daha açık renk tonları ile gösterilmektedir. Tüm dönemler incelendiğinde yüksek değer genellikle İstanbul tarafındaki mahallelerde, düşük değer ise genellikle çalışma alanının Kocaeli tarafındaki mahallelerde dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Çalışma bölgesinin batısındaki Pendik ilçesinin mahallerinde 2017 yılından itibaren değer artışı olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca yüksek ortalama rayiç değerlerine sahip mahalleler (Osman Yılmaz Mah., Hacıhalil Mah., Sultan Orhan Mah.) çalışma alanının Kocaeli tarafında da mevcuttur. Böylelikle üretilen bu tematik haritalar üzerinden ortalama rayiç değerlerdeki bölgesel dağılım farklılıkları açıkça görülmektedir.



Şekil 6. Mahalle düzeyinde ortalama arsa rayiç değer dağılımları (2015-2020)

3.2.2 Konumsal Otokorelasyon Sonuçları

Mahalle idari biriminde ortalama arsa rayiç birim değerlerine ilişkin Global Morans'ı istatistiğini temel

alan global düzeyde konumsal otokorelasyon analizi gerçekleştirildi. Analiz için komşuluk ilişkilerinde sabit mesafe (fixed distance) metodu esas alınmıştır. 2015-2020 dönemlerine ilişkin her bir yıl için CBS

ortamında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına Çizelge 3’de yer verilmiştir.

Konumsal otokorelasyonun global düzeyde değerlendirilmesini sağlayan Global Moran’s I istatistik değerinin -1 ile +1 değeri aralığında olduğu göz önüne alınırsa, Çizelge 1’den görüleceği üzere analiz sonuçları tüm yıllarda yüksek anlamlılık düzeyinde (z-değeri >2,58, p-değeri < 0.01 ve %99 güven aralığında) konumsal kümelemesinin mevcut olduğu görülmektedir (Şekil 3). Global Moran’s I istatistik değerine göre en yüksek kümeleme 2017 yılına ait iken, en düşük kümelemenin 2018 yılına ait olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Yıllara göre ortalama arsa rayiç değerleri mekânsal otokorelasyon analiz sonuçları.

Yılla r	Moran's I İndeksi	Beklenen I İndeks Değeri	Varyans	z değeri	P değeri
2015	0,825912	-0,01136	0,001763	19,94275	0,00
2016	0,825925	-0,01136	0,001763	19,94294	0,00
2017	0,826016	-0,01136	0,001763	19,94519	0,00
2018	0,808207	-0,01136	0,001765	19,50863	0,00
2019	0,822238	-0,01136	0,001765	19,84298	0,00
2020	0,812654	-0,01136	0,001770	19,58825 3	0,00

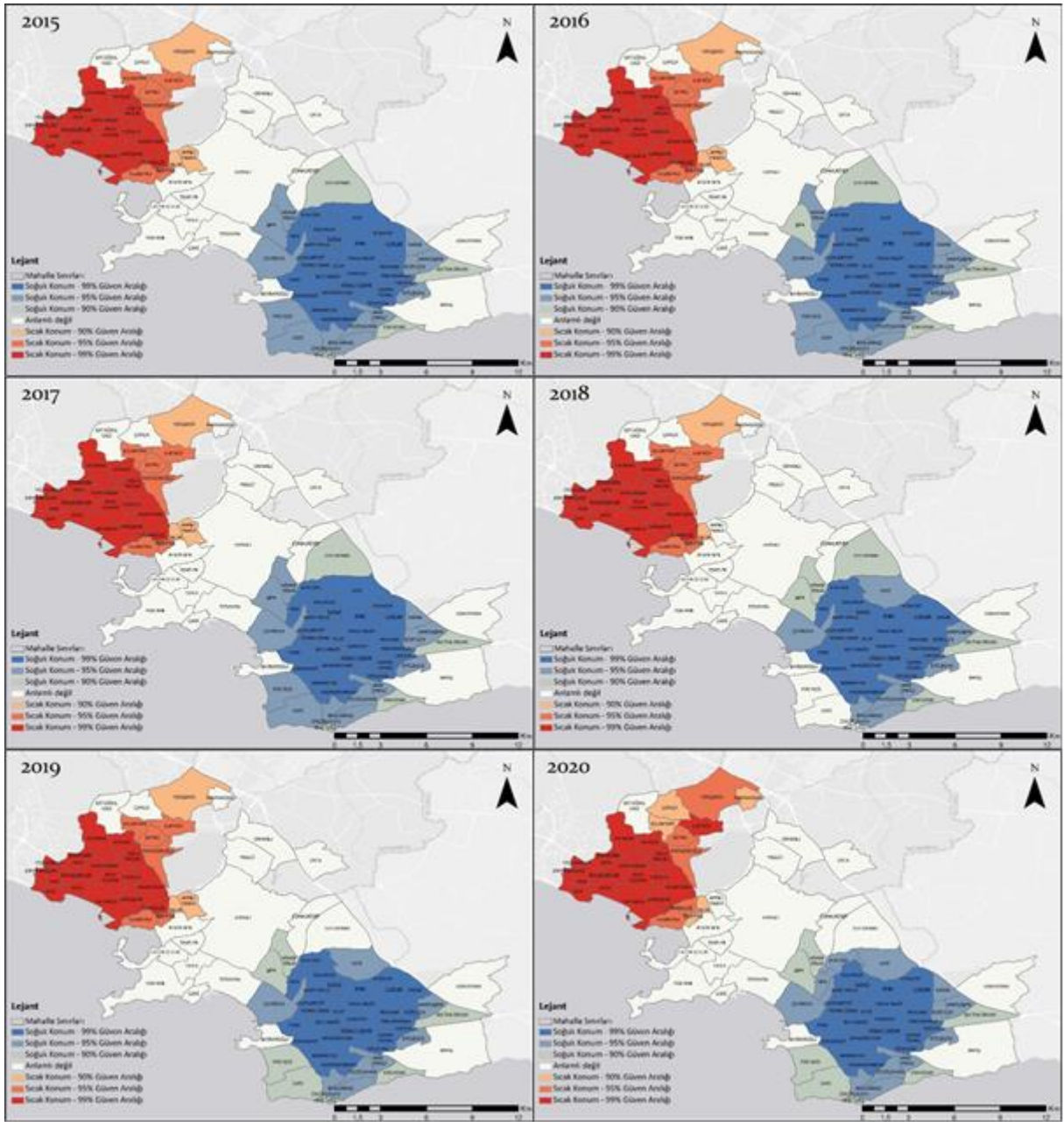
3.2.3 Mahalle Bazında Rayiç Değer Kümeleme Analizleri

Mahalle idari biriminde ortalama arsa rayiç birim değerlerine ilişkin Getis-Ord G^* istatistiğini esas alan ve yerel düzeydeki konumsal kümelemelerin tespiti için CBS tabanlı Sıcak-konum (Hot Spot) analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz için komşuluk ilişkilerinde konumsal otokorelasyonun belirlenmesinde olduğu gibi sabit mesafe (fixed distance) metodu esas alınmıştır. 2015-2020 yılları için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre üretilen haritalar Şekil 7’de verilmiştir.

Haritalar irdelendiğinde, Sıcak-konum (Hot Spot) analiz sonuçlarına göre çalışma alanının belirli bölgelerinde sıcak ve soğuk kümelemelerin olduğu, her bir yılda kümelemelerin aynı bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Başka bir ifade ile Sıcak-konum analizine göre her bir dönem için %90, %95 ve %99 olmak üzere üç anlamlılık düzeyinde Sıcak ve Soğuk-konum kümelemeleri oluşmuştur. Haritalarda Sıcak-konumlar (Kırmızı tonları) mahalle bazındaki ortalama arsa rayiç değerlerinin yüksek

konumsal kümelemelerini temsil ederken, Soğuk-noktalar (Mavi tonları) ise mahalle bazındaki ortalama arsa rayiç değerlerinin düşük konumsal kümelemelerini temsil etmektedir.

Sıcak-konum kümelemeleri her bir yıl için çalışma alanının özellikle İstanbul/Pendik ilçesi mahallelerinde meydana gelirken, Soğuk-konum kümelemeleri ise çalışma alanının Kocaeli tarafı mahallelerinin genelinde yüksek anlamlılık düzeylerinde meydana gelmiştir. Başka bir ifade ile İstanbul ve Kocaeli ilini birbirinden ayıran il sınırı, değerlendirmeye alınan 6 yıl süresince Sıcak ve Soğuk-konum kümelemeleri üzerinde ayırt edici unsur olmuştur. Diğer taraftan iller arasında farklılık arz eden bu kümeleme sonuçları T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü tarafından 2017 yılında yayınlanan “İllerin ve Bölgelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırması” raporunda [SEGE, 2017] belirtilen İstanbul ve Kocaeli illeri için hesaplanan Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik skoru ile benzer niteliktedir.

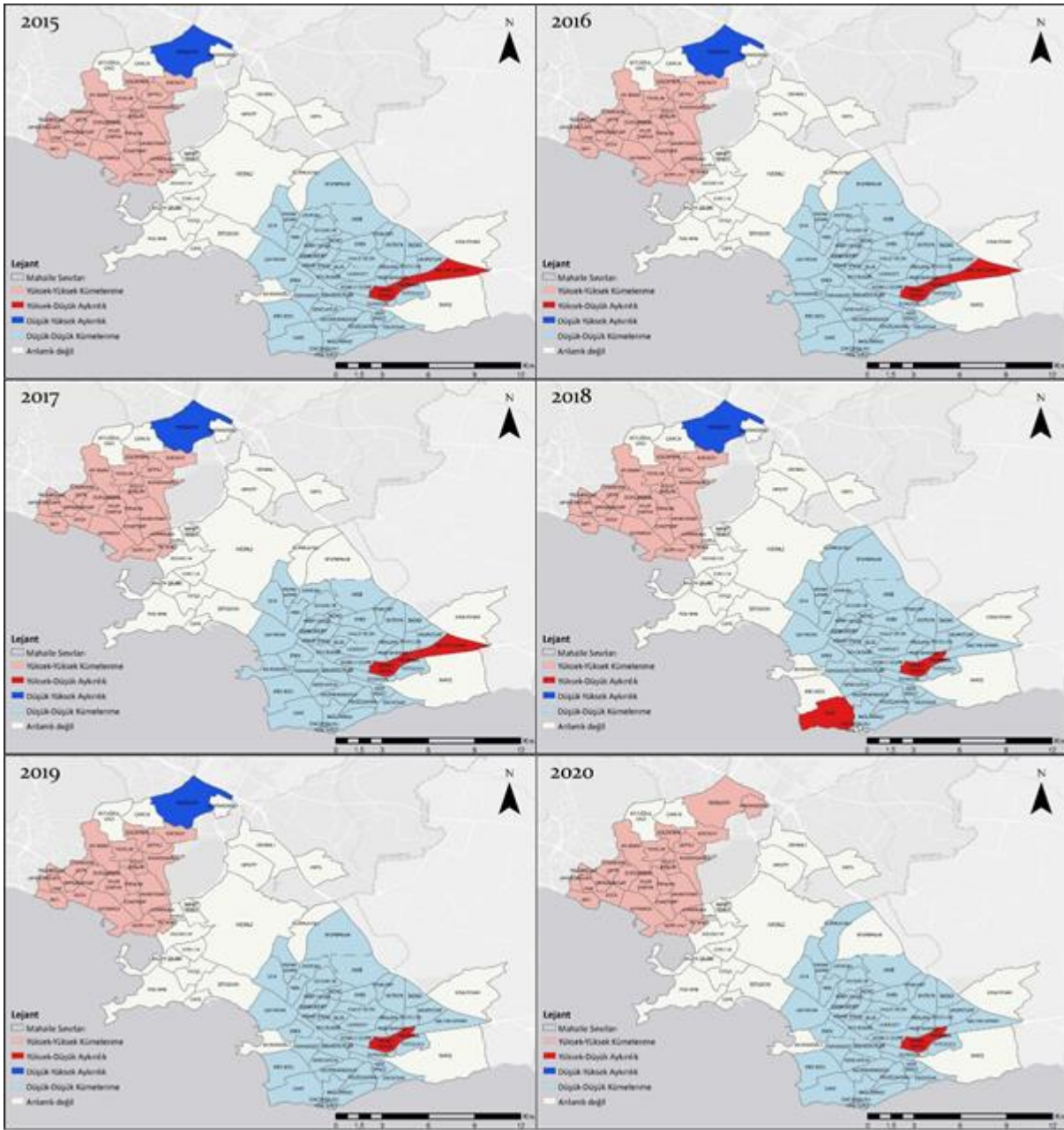


Şekil 7. Mahalle bazında ortalama arsa rayiç değer Sıcak-konum kümeleme analiz sonuçları (2015-2020).

3.2.4 Mahalle Bazında Rayiç Değer Aykırılık Analizleri

Mahalle idari biriminde ortalama arsa rayiç birim değerlerine ilişkin Lokal Moran's I istatistiğini esas alan, yerel düzeydeki konumsal kümelemeler ve aykırı konumların tespiti için CBS tabanlı Kümeleme ve Aykırılık (Cluster and Outlier) analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz için komşuluk ilişkilerinin belirlenmesinde diğer iki analize benzer şekilde sabit mesafe (fixed distance) metodu kullanılmıştır. 2015-2020 yılları arasında her bir yıl için

gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre üretilen haritalar Şekil 8'da verilmiştir.



Şekil 8. Mahalle düzeyinde ortalama arsa rayiç değer kümeleme ve aykırılık (Cluster and Outlier) analiz sonuçları (2015-2020).

Analiz sonuçlarına göre her bir yıl için çalışma alanının belirli bölgesinde yüksek anlamlılık düzeyinde konumsal kümelenmeler oluşmuş olup, kümelemeler benzer konumlarda yoğunlaşmıştır. Analiz sonucunda her bir yıl için Yüksek-Yüksek ve Düşük- Düşük kümelenmeler ile Yüksek-Düşük ve Düşük-Yüksek aykırılıkları temsil eden toplam dört grupta sonuçlar elde edilmiştir.

Haritalardaki Yüksek-Yüksek kümelenmeler mahalle idari birimindeki yüksek ortalama rayiç değerlere sahip olan mahallelerin, aynı zamanda yüksek ortalama rayiç değerlere sahip olan komşu mahalleler ile çevrili olduğu bölgeleri temsil etmektedir. Bu kapsamda çalışma alanının İstanbul

tarafında özellikle Pendik ilçesinde bulunan belirli mahalleler 6 yıl geneline yüksek anlamlılık düzeyinde Yüksek-Yüksek konumsal kümelemeler sergilemiştir. Pendik ilçesine bağlı Yeni, Doğu, Batı, Kaynarca gibi mahalleler ise 2015 yılından itibaren sürekli Yüksek-Yüksek konumsal kümeleme gösteren mahallelerdir. 2015-2019 arasında kapsayan 5 yılda Yüksek-Yüksek konumsal kümelemeler sergileyen konumlar sürekli aynı mahallelerde iken, 2020 yılında Yüksek-Yüksek kümelemeler grubuna İstanbul Pendik ilçesi sınırlarında bulunan Yenışehir ve Harmandere mahalleleri eklenmiştir. Bu durum doğrudan bu mahallerdeki nüfus artış oranı ve kentsel donatı alanlarının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu kapsamda Pendik ilçesi

mahallelerine ilişkin 2019-2020 nüfus artışları oranları irdelendiğinde Harmandere Mahallesi %3.72 artış oranı ile 5.sırada, Yenişehir mahallesi ise %3.15 artış oranı ile 8. sırada yer almaktadır. Ayrıca "Pendik Belediyesi Faaliyet Raporu 2020" incelendiğinde ise, Devam Eden Yapı Tesis Faaliyetleri" arasında Harmandere 2 Konutları (178 adet daire; 12 adet iş yeri) yapımı, "Tamamlanan Yapı Tesis Faaliyetleri" arasında Yenişehir Mahallesi Modern Pazar Alanı' tesisi tamamlandığı belirtilmiştir. Rapora göre bu donatı alanlarının yanı sıra Yenişehir ve Harmandere mahalleleri genelinde ampute soyunma odaları, dinlenme alanları, eğitim parkları gibi donatı alanlarının sayıları artırılmıştır. (Pendik Belediyesi, 2020)

Haritalardaki Düşük-Düşük kümelemeler, mahalle idari birimindeki düşük ortalama rayiç değerlere sahip olan mahallelerin, aynı zamanda düşük ortalama rayiç değerlere sahip olan komşu mahalleler ile çevrili olduğunu ifade etmektedir. Bu kapsamda çalışma alanının Kocaeli tarafındaki mahallelerin çoğunluğu ve Kocaeli sınırında bulunan İstanbul/Tuzla ilçesine bağlı Şifa ve Mimar Sinan mahalleleri 6 dönem genelinde yüksek anlamlılık düzeyinde Düşük-Düşük mekânsal kümelemeler sergilemiştir. Diğer taraftan Düşük-Düşük konumsal kümelemeler grubunda zaman içerisinde değişimler meydana gelmiştir. Örneğin Kocaeli ili Darıca ilçesine bağlı Bayramoğlu Mahallesi 2016 ve 2017 yıllarında Düşük-Düşük kümelemeler grubunda iken, diğer yıllarda anlamlı bir kümeleme sergilememiştir. Kocaeli ili sınırlarında bulunan Cumhuriyet, Şekerpınar ve Piri Reis Mahalleleri de yine zaman içerisinde kümelemelerde farklılıklar gösteren mahalleler arasındadır.

Haritalardaki Yüksek-Düşük aykırılıklar, mahalle idari birimindeki yüksek ortalama rayiç değerlere sahip olan mahallelerin, düşük ortalama rayiç değerlere sahip olan komşu mahalleler ile çevrili olduğu bölgeleri temsil etmektedir. Bu kapsamda çalışma alanının Kocaeli tarafında bulunan belirli mahalleler zaman içerisinde değişmekle birlikte yüksek anlamlılık düzeyinde Yüksek-Düşük konumsal aykırılıklar sergilemiştir. 2015-2017 arası 3 yılda Yüksek-Düşük konumsal aykırılık gösteren mahalleler Osman Yılmaz, Hacihalil ve Sultan Orhan Mahalleleri, 2018 yılında Osman Yılmaz, Hacihalil ve Cami Mahalleleri, 2019-2020 arasındaki 2 yılda ise Osman Yılmaz ve Hacihalil Mahalleleri olarak tespit edilmiştir. 6 yıl için yapılan genel değerlendirme de ise Osman Yılmaz ve Hacihalil Mahalleleri Yüksek-Düşük mekânsal aykırılıklar gösteren mahalleler

olarak değerlendirilebilir. Diğer taraftan bu mahalleler arasında Cami Mahallesi 2015-2017 döneminde Düşük-Düşük kümelenme yapısına olmasına rağmen, 2018 yılında büyük ölçüde farklılaşarak Yüksek-Düşük aykırılık yapısına dahil olan değişimin çarpıcı olduğu mahalledir. Cami Mahallesinin bu durumu irdelendiğinde 2017-2018 döneminde %6.98 nüfus artış oranı ile Darıca ilçesinin en fazla nüfus artış oranına sahip mahallesi olması ile ilişkilendirilebilir.

Haritalardaki Düşük-Yüksek aykırılıklar mahalle idari birimindeki düşük ortalama rayiç değerlere sahip olan mahallelerin, yüksek ortalama rayiç değerlere sahip olan komşu mahalleler ile çevrili olduğu bölgeleri temsil etmektedir. Bu kapsamda çalışma alanının İstanbul/Pendik ilçesi'ne bağlı olan Yenişehir Mahallesi 2015-2019 arası 5 dönemde Düşük-Yüksek mekânsal aykırılıklar grubunda yer almıştır. 2020 yılı için ise herhangi bir Düşük-Yüksek mekânsal aykırılık tespit edilmemiştir. Yenişehir Mahallesi 2020 yılında Yüksek-Yüksek mekânsal kümelemeler grubuna dahil olmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Nüfus artışı ile büyüyen ve gelişen şehirlerde, mevcut kentsel donatılara yakınlığa ve sosyo-ekonomik yapıya bağlı olarak yerleşim alanlarında farklılaşan gelişmişlik düzeyi söz konusu olmuştur. Bu süreç, doğrudan planlamaya bağlı olmadan, zaman içinde değişen politikalara ve yatırım eğilimlerine göre gelişim göstermiştir. Bu durum, geçmişten bugüne kadar birçok farklı arazi yönetimi uygulamasında karşımıza çıkan Taşınmaz Değerlemesi için de önem arz etmektedir.

Arsa rayiç değerinde, komisyonun uyguladığı yaklaşım itibarıyla alım-satım işlemlerinde ve kamulaştırma işlemlerinde gerçek değeri yansıtmaması nedeniyle çeşitli eleştiriler olsa da, yerel düzeyde taşınmaz değerinde farklılıkların ve zamansal değişimin analizinde kullanılabilir niteliktedir. Bu çalışmada, sokak düzeyinde belirlenen rayiç değerlerin mahalle ortalaması alındığında, e-devlet sisteminden erişilen ara yüzler ile her bir ilçedeki mahalleler ve farklı yıllardaki değerleri ile değişimin analizi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada arsa rayiç değeri (metrekare birim değeri), çalışma alanında 89 mahallenin 2015-2020 yılları arasındaki konumsal-zamansal dağılımının ve değişiminin incelenmesinde kullanılmıştır. CBS tabanlı kümeleme analizleri olan konumsal otokorelasyon, sıcak-konum kümeleme analizi,

kümeleme ve aykırı konum analizleri yapılarak taşınmaz yönetimi için mahalle düzeyinde yaklaşım belirlenmiştir.

Arsa rayıç değerinin yıllara göre zamansal değişimi incelendiğinde; sürekli artış gösterdiği belirlenmekle birlikte, 2017 yılında bir sıçrama olduğu tespit edilmiştir. Rayıç değerlerin mahalle bazlı üretilen tematik haritalarında, İstanbul ili Pendik ve Tuzla ilçeleri mahallelerinin genel anlamda yüksek, Kocaeli ili Gebze, Çayırova ve Darıca ilçeleri mahallelerinin düşük değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, İstanbul-Kocaeli arasındaki geçişin sosyo-ekonomik vb. faktörler çerçevesinde, bölgesel farklılıkların arsa rayıç değer dağılımına etkisini ortaya koymaktadır. Yüksek-Yüksek konumsal kümelemeler genelde İstanbul ilinde Pendik ilçesinin Yeni, Doğu, Batı, Kaynarca gibi mahallerinde; Düşük-Düşük konumsal kümelemeler ise genelde Kocaeli ilinde Gebze ilçesinin Gaziler, Yavuz Selim, Ulus, Beylikbağı gibi mahallelerindedir. Gebze-Tuzla arasındaki geçiş, yıllar içerisinde farklılık gösterdiğinden bu mahalleler de kimi zaman Düşük-Düşük kümelenmelere dahil olurken kimi zaman anlamlı bir kümelenme göstermemiştir. Bu noktada birim satış değer tespiti esnasında kaynaklanan sorunlar da değişimlerin analiz sonuçlarına yansımaktadır. Yüksek değer kümelenmesi olan mahalleler arasında Pendik ilçesi Yenişehir Mahallesi, düşük değer kümelenmesi olan mahalleler arasında Gebze ilçesi Osman Yılmaz ve Hacıhalil mahalleleri genellikle aykırı değer eğilimi olan mahalleler olarak belirlenmiştir.

Arsa birim değer tespitindeki problemlerin giderilmesi ile zamansal ve konumsal analizlerin daha anlamlı, gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesi mümkün olacaktır. Bu sayede, CBS tabanlı zamansal değişimin tespiti çalışmalarının ileride taşınmaz geliştirme çalışmalarına önemli ölçüde katkı sağlaması beklenmektedir. Özellikle konut sektörüne yatırım yapmayı planlayanların; analiz sonuçlarını göz önünde bulundurmasına ve yatırımlarının daha etkili olmasına yardımcı olacaktır. Yerel yönetimler, kentsel gelişim politikalarını belirlemek ve farklılıkları azaltmak için uygulama imar planı değişikliğinde ve kentsel donatıların yer seçiminde bu çalışmalardan yararlanabilir. Ayrıca konumsal kümelemeler arkasındaki istatistiksel parametreler irdelenerek, gelecek yıllara yönelik arsa rayıç değer tahmin haritaları oluşturulabilir. Ek olarak, değişim haritası sonuçlarına ait kümelemeler baz alınarak, CBS

tabanlı mahalle bazlı en uygun konut yer seçim analizleri gerçekleştirilebilir.

5. Kaynaklar

- Açlar A., Çağdaş V., 2002. Taşınmaz (Gayrimenkul) Değerlemesi, HKMO yayını, Ankara, 1-486.
- Anselin, L., 1995. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, **27(2)**, 93-115.
- Atalay, A., 2010. Türkiye’deki Trafik Kazalarının Mekansal ve Zamansal Analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 233.
- Bayraktutan, Y., Tüylüoğlu, Ş., Özbilgin, M., 2012. Lojistik Sektöründe Yoğunlaşma Analizi ve Lojistik Gelişmişlik Endeksi: Kocaeli Örneği. *Journal of Alanya Faculty of Business/Alanya İisletme Fakültesi Dergisi*, **4(3)**, 61-71.
- Bozdağ, A. ve Ertunç, E., 2020. CBS ve AHP Yöntemi Yardımıyla Niğde Kenti Örneğinde Taşınmaz Değerleme. *Geomatik*, **5(3)**, 228-240.
- Ersungur, Ş. M., Kızıltan, A., Polat, Ö., 2007. Türkiye’de Bölgelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması: Temel Bileşenler Analizi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, **21(2)**, 55-66.
- Eyyuboğlu, B.B., 2015. Sosyal bilimlerde mekânsal istatistik ve coğrafi bilgi sistemleri: Kuramdan uygulamaya. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 107.
- Güngör, E. 1999. Gayrimenkul Değerlemesi ve Türkiye’de Sermaye Piyasalarında Gayrimenkul Ekspertiz Şirketlerine Yönelik Düzenlemeler Yapılmasına İlişkin Öneriler, SPK Yeterlik Etüdü, 1-58.
- Kervankıran, İ. Aktürk, M., 2017. Türkiye’deki Konaklama İstatistiklerinin İllere Göre Mekânsal Analizi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, **(36)**, 83-96.
- Lee, J. ve Wong, D.W., 2001. Statistical analysis with ArcView GIS. John Wiley & Sons, 156-189.
- Pendik Belediyesi, 2020. Pendik Belediyesi Faaliyet Raporu 2020. Erişim Adresi: https://www.pendik.bel.tr/data/dokumanlar/6079730646427_2020-faaliyet-raporu.pdf.
- Requia, W., Roig, H., 2015. Analyzing Spatial Patterns of Cardiorespiratory Diseases in the Federal District, *Brazil Health*, **07(10)**, 1283-1293. <https://doi.org/10.4236/health.2015.710143>
- SEGE, 2017. İllerin ve Bölgelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırması Raporu. Erişim

Adresi:https://www.bebka.org.tr/admin/datas/sayfas/89/sege-2017_1581687211.pdf

9-<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-moran-s.htm>, (18.02.2021)

Töremen, E. (2018). Emlak Vergisine Esas Arsa Birim Değerlerinin Belirlenmesindeki Sorunlar ve Çözüm Önerileri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **2(2020)**, 21–42.

Yalçın, M. ve Kaya, K., 2019. Türkiye’de Solunum Sistemine Bağlı Ölüm Oranlarının Mekansal Kümelenmelerinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19(3)**, 750-761.

Yalçın, M., 2020. Türkiye Konut Satış İstatistiklerinin CBS Tabanlı Analizleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **20(3)**, 448-455

Yalçır, Ş., 2007. Bulanık mantık metodolojisi ile taşınmaz değerlendirme modelinin geliştirilmesi ve uygulaması: Konya örneği .Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 248.

Yalçır Ş, ve Ünel , F.B., 2016. Türkiye’de Uluslararası Çalışmalarda Arsa Değerlemede Kullanılan Kriterlerin İrdelenmesi ve Faktör Analizi ile Azaltımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **16(2)**, 303-322.

İnternet kaynakları

1-<https://www.turkiye.gov.tr/pendik-belediyesi-arsa-rayic>, (10.01.2021)

2-<https://www.turkiye.gov.tr/tuzla-belediyesi-arsa-rayic>, (10.01.2021)

3-<https://www.turkiye.gov.tr/gebze-belediyesi-arsa-rayic>, (10.01.2021)

4-<https://www.turkiye.gov.tr/darica-belediyesi-arsa-rayic-degeri-sorgulama>, (10.01.2021)

5-<https://ebelediye.cayirova.bel.tr/web/guest/5>, (10.01.2021)

6-<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>, (10.02.2021)

7-<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/what-is-a-z-score-what-is-a-p-value.htm>, (10.02.2021)

8-<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/hot-spot-analysis.htm>, (18.02.2021)

Monitoring of Groundwater Level Change with Geographical Information System (GIS), The Case of Konya Altınekin Basin

S. Savaş DURDURAN¹, Aslı BOZDAĞ², Cafer Tayyar OKKA¹, Tansu ALKAN^{1*}

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Konya.

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Konya.

durduran2001@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0509-4037>

aslibozdag@ohu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2178-6527>

ctokka@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8338-8431>

Corresponding author* e-posta: tansualkan93@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8293-2765>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 11.06.2021

Abstract

Among the groundwater resources in Turkey, there are quite important basins with their agricultural land use characteristics and ecological characteristics. One of them, Konya Closed Basin (KCB), along with its sub-basins, has Turkey's grain reserves. However, over the last years, over-exploitation of groundwater resources, water-level reductions have become a threat to the ecological structure of the sinkholes and the basin. In order for this process to be analysed with all its causes and measures can be taken, it is necessary to monitor and record the changes that are experienced. In this context, Geographical Information System (GIS) is important as a system that can demonstrate the change in the basin. In this study, the change of groundwater level was investigated with the help of GIS, in order to protect the ecological balance in the KCB Altınekin Basin, where significant decreases in groundwater level have been experienced in recent years. The change in the data of 2015 and 2016, which was obtained from 10 water wells where the groundwater level in this basin was identified, was analysed with the aid of GIS. It has been found that the groundwater level in the basin changes with agricultural land use characteristics, daily use, and climatic changes.

Keywords

GIS;
Groundwater level
change;
Climatic changes;
Konya Altınekin Basin

Yeraltı Suyu Seviyesi Değişikliğinin Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile İzlenmesi, Konya Altınekin Havzası Örneği

Öz

Türkiye'deki yeraltı suyu kaynakları arasında tarımsal arazi kullanım özellikleri ve ekolojik özellikleri ile oldukça önemli havzalar bulunmaktadır. Bunlardan biri olan Konya Kapalı Havzası (KKH) alt havzalarıyla birlikte Türkiye'nin tahıl rezervlerine sahiptir. Bununla birlikte, son yıllarda yeraltı suyu kaynaklarının aşırı kullanımı, su seviyesinin düşürülmesi, obrukların ve havzanın ekolojik yapısı için bir tehdit haline geldi. Bu sürecin tüm nedenleri ile analiz edilebilmesi ve önlemlerin alınabilmesi için yaşanan değişimlerin izlenmesi ve kayıt altına alınması gerekmektedir. Bu bağlamda Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), havzadaki değişimi gösterebilen bir sistem olarak önemlidir. Bu çalışmada, son yıllarda yeraltı suyu seviyesinde önemli düşüşlerin yaşandığı KKH Altınekin Havzası'nda ekolojik dengenin korunması amacıyla yeraltı suyu seviyesinin değişimi CBS yardımı ile araştırılmıştır. Bu havzadaki yeraltı suyu seviyesinin tespit edildiği 10 adet su kuyusundan elde edilen 2015 ve 2016 verilerindeki değişim CBS yardımı ile analiz edilmiştir. Havzadaki yeraltı suyu seviyesinin tarımsal arazi kullanım özelliklerine, günlük kullanıma ve iklim değişikliklerine göre değiştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

CBS;
Yeraltı suyu seviyesi
değişikliği;
İklim değişikliği;
Konya Altınekin
Havzası

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Introduction

Water is a vital component for sustaining the lives and the needs of the living creatures and the environmental structure (Başçiftçi *et al.* 2013, Tiwari

et al. 2017). It is distributed in the forms of river water, spring water, sea water and rainwater in nature. Among these, the underground waters are expressed as an extremely important, low cost and

reliable water resource type with some natural characteristics such as consistent temperature, widespread and continuous availability, quality and limited precision (Todd and Mays 2005).

Groundwater, which is used for the basic needs of living things, serves as the main water resources in the urban environment, for industrial and domestic purposes, and provide all the comfort of living things (Singh *et al.* 2014, Krishnaraj *et al.* 2015). The groundwater constitutes about 0.61% of the world's water, including ocean and permanent glaciers, despite the need for its extensive use (Tiwari *et al.* 2017). This situation is projected to be causing a water shortage in 2025 in the UNESCO report, and a 50% reduction in the amount of water available per capita is expected (Başçiftçi *et al.* 2013).

Global warming, climate change, agricultural irrigation, meteorological, hydrological and geological reasons, population growth, urbanization, food and energy security policies, globalization of trade and changing consumption patterns affect water demand (Başçiftçi *et al.* 2013, WWAP 2015, Yılmaz 2010). Along with this interaction, the groundwater level is also decreasing. For this reason, in many countries, degradation of groundwater quality and the decreasing groundwater levels are among the urgent problems (Verma *et al.* 2017, Tiwari *et al.* 2017). This threatens ecosystems and even the lives of future generations (Tsakiris 2004). In this context, the conservation and use of water resources should be planned in a long-term and sustainable manner (Jha *et al.* 2010, Çelik *et al.* 2016).

The planning process for water resources requires the changes to be recorded, monitored and the measures and policies to be developed against the threats in the face of problems. GIS is an important application tool for the rapid organization and storage of large volumes of hydrological and hydrogeological data related to this planning process, the temporal and spatial monitoring of environmental changes, and the construction and management of thematic maps (Jha *et al.* 2007, Jha *et al.* 2010, Başçiftçi *et al.* 2013, Krishnaraj *et al.* 2015).

There are many studies in the literature about the measurement of changes in the groundwater

resources with GIS. GIS is used in reviewing the quality and pollution of groundwater created by a particular agricultural production preference and urban land use changes in the urban area (Babiker *et al.* 2004, Almasri and Kaluarachchi 2004, Nas and Berktaş 2010, Krishnaraj *et al.* 2015), the determination of groundwater levels and fluctuations and the mapping of protected areas in general (Jha *et al.* 2010, Başçiftçi *et al.* 2013, Chandra *et al.* 2015, Tiwari *et al.* 2016, Chandan and Yashwant 2017, Arya *et al.* 2018, Çelik and Hamidi 2018, Çıldır *et al.* 2019, Anand *et al.* 2020), in the examination of groundwater level changes arising due to use and land cover change in special areas such as agricultural areas (Dinka *et al.* 2013, Çelik *et al.* 2016, Balasubramani *et al.* 2019) and the development of a three-dimensional groundwater flow model (Gossel *et al.* 2004). GIS is an important tool in recent years, especially for the mapping of risks to the spatial registration, consolidation, and prevention of losses in groundwater for the development of a groundwater information management system' in the sustainable management of groundwater resources (Papatheodorou *et al.* 2017).

In this study, in addition to the studies reviewed in the literature, changes occurring in the groundwater level, at Altınekin Basin, one of the literature's attractive study areas in the province of Konya in Turkey, have been discussed. Here, the change in groundwater level, which threatened human life and settlements, was analysed using GIS, precipitation, climatic and environmental factors. As a result, the cause of this change was determined, and the measures and strategies to be taken were put forward.

2. Material and Method

Sustainable use of the country's water resources should be developed at all levels of local, regional, national and international level. The basins that contain water resources at almost all levels are areas that are important for the continuity of water assets, with their characteristics of being open or closed. In Turkey, KCB is a large closed basin and has about 17% of the country's groundwater potential (Int. Rsc. 1).

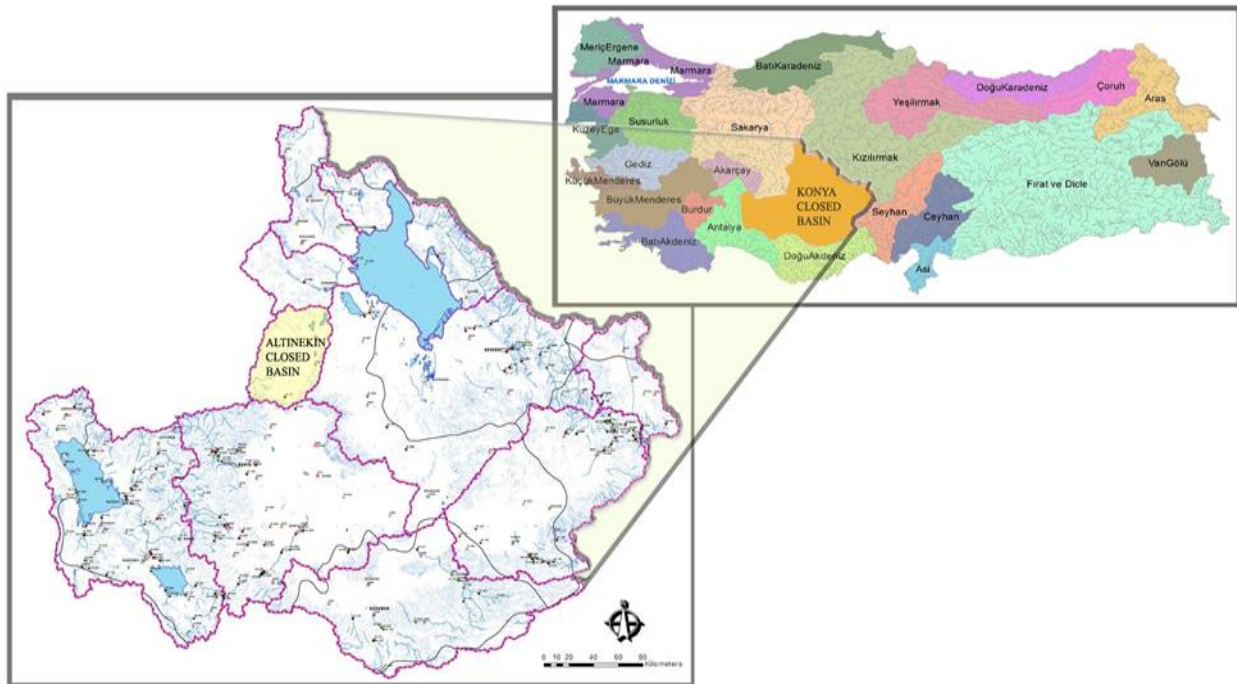


Figure 1. The location of Konya Closed Basin (Int. Rsc. 2, Okka et al. 2018)

KCB carries an offshore basin characteristic that does not drain its waters into the sea, which is rare in the world (Figure 1). This feature is due to the fact that it is surrounded by volcanic mountainous areas

of 3,534 meters, expressed in the Digital Elevation Model and the Geological Structure, indicating the topographic structure of the KCB, and the limestone feature of the water holding basin (Figure 2).

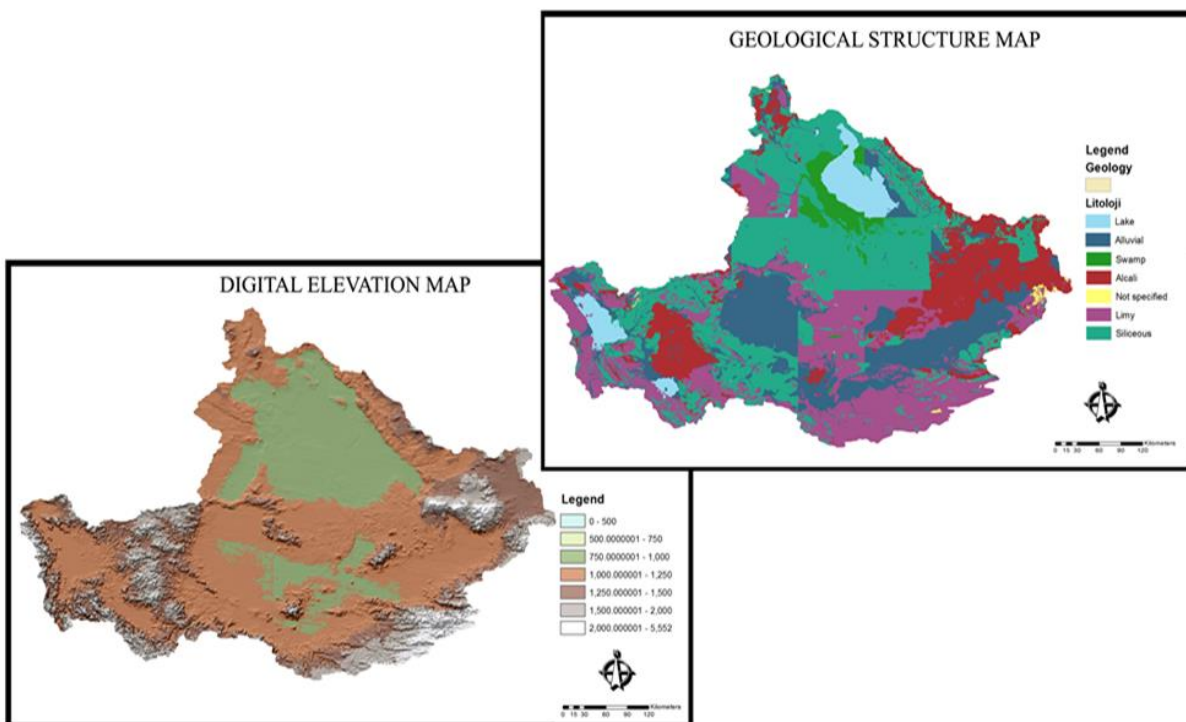


Figure 2. Digital elevation model of KCB and its geological situation

KCB is one of Turkey's areas that has the least rainfall and the average annual precipitation is 300-350 mm (Şen and Başaran 2007) (Figure 3).

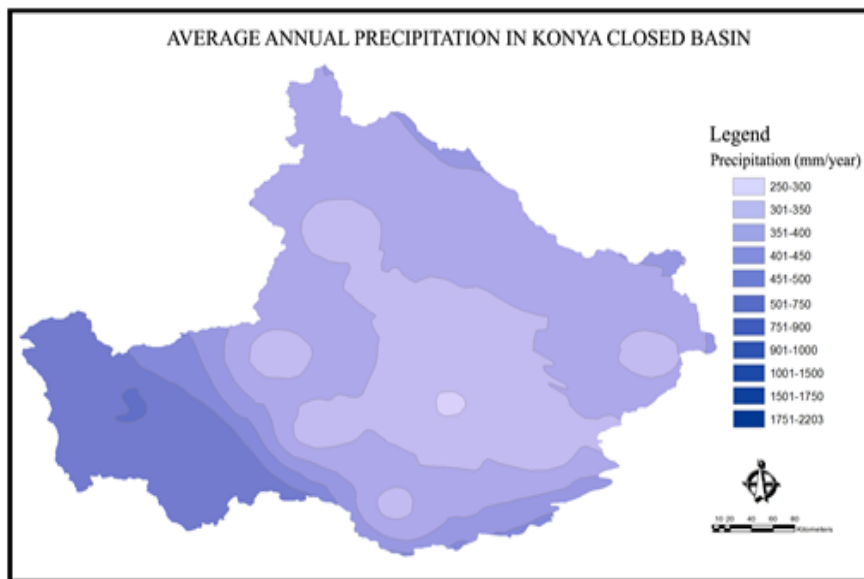


Figure 3. The average annual precipitation in KCB

Given the increasing human population, extreme water use for agricultural and industrial purposes, and other factors, it has been observed that over the last 30 years there has been a decline of 10-25 mm per year in rainfall over the Basin. Underground water level measurements of 24 wells operated by the 4th Regional Directorate of State Hydraulic Works confirm this concern. In all of the 24 wells, a decrease in groundwater level was observed (mean 0.77 m). 30-40 years of significant declines groundwater level reaching up to 1m in certain areas in KCB, which highly contributes to Turkey's agricultural and industrial inputs, cause the formation of ecological and environmental disasters such as sinkholes (Üstün *et al.* 2007, Bozyiğit and Tapur 2009).

KCB is divided into 9 different basins in itself. Within the KCB, in the Altinekin Subbasin there are negative conditions in the ecological balance due to the decrease in the amount of rainfall received in recent years and the amount of groundwater drawn above the reserve for agricultural production purposes. In order to measure these adverse conditions and to

be able to take measures, Altinekin Subbasin was determined as the study area. The Altinekin Subbasin is located in the northwest of the KCB (Figure 1).

In the scope of the study, first of all, the digital elevation model which shows the topographical structure of Altinekin Basin was created with the help of ArcGIS 10.3.1 software. According to the slope analysis carried out over the digital elevation model, it is determined that the basin is surrounded by high mountains and that the middle parts are of plain characteristic (Figure 4). The minimum height for the basin is 938 m around the Bulak Lake and the maximum elevation is 1300 m in the mountains surrounding the basin.

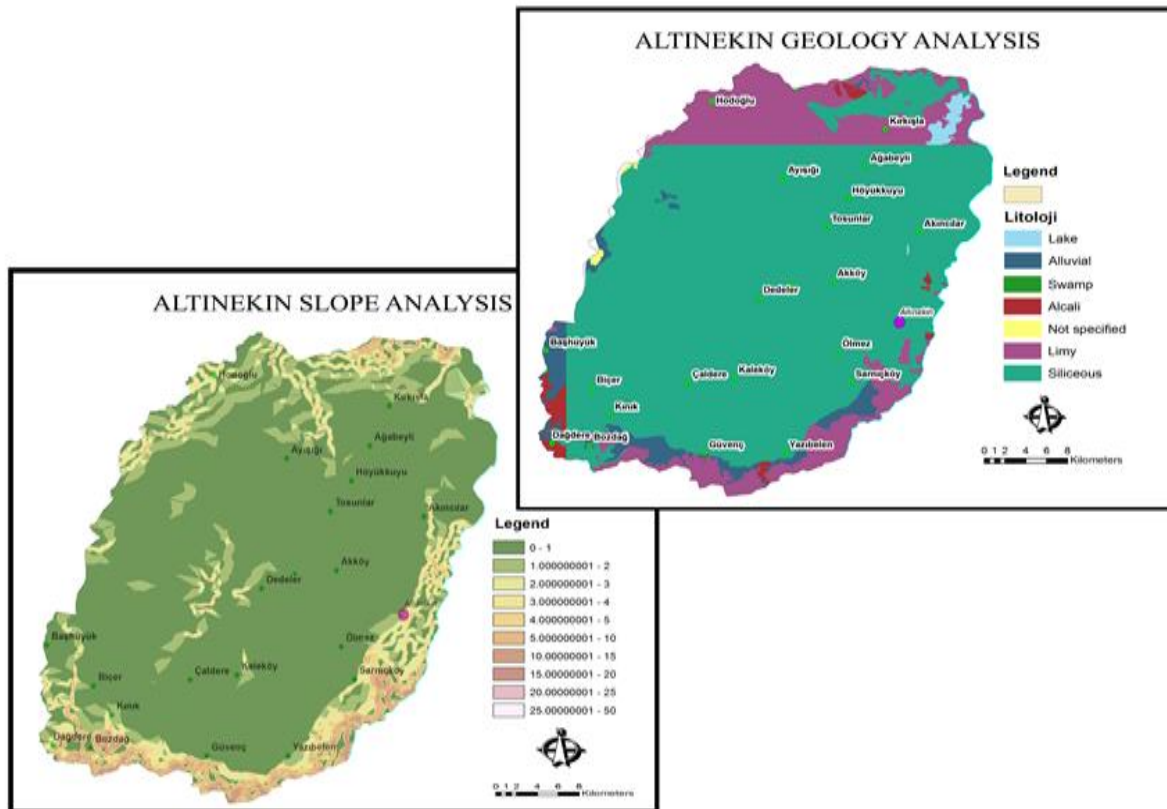


Figure 4. The slope and geologic situation in Altinekin Basin

The geological structure consists of neogene, limestone, claystone, conglomerate, neogene clayey limestone, mesozoic limestone, pliocene clayey sand and alluvium pliocene strata (Figure 4). The topographical structure and geological structure of the basin are important for forming a closed basin by holding groundwater. However, the topographical structure of the basin is not suitable for the establishment of facilities for the storage of water.

The Altinekin Basin land use situation was evaluated according to the data prepared by the CORINE program. The land cover/use data, which was generated by the computer-assisted visual interpretation method over satellite images according to the Land Cover Usage Classification determined by the European Environment Agency, was regulated according to the needs of the study (Figure 5). Altinekin Basin consists mostly of non-irrigable and arable land at the proportion of %47, irrigable and arable area of 3%, 33% maquis and herbaceous plants and sparse plant areas, 7% forest and pastures. Other land use features make up 10%

of Altinekin Basin. Since the topography of the basin does not allow the establishment of facilities for the storage of water, water is drawn from the wells in order to irrigate the non-irrigable plots of arable land which negatively affects the groundwater level change.

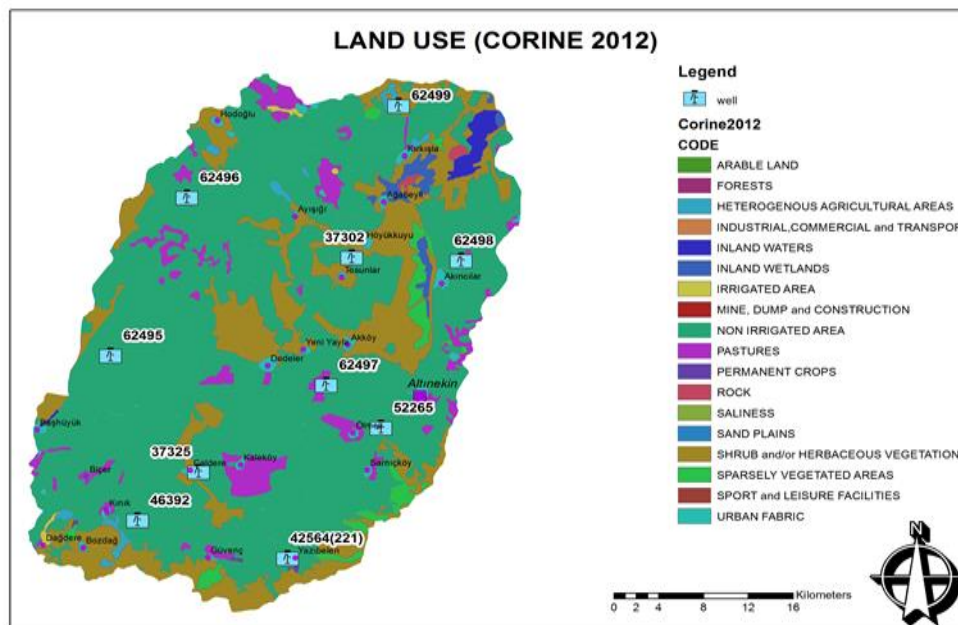


Figure 5. Land use in Altinekin Basin (Int. Rsc. 3)

This is due to the land use feature in the basin and when the area is analyzed by the amount of precipitation change, the danger that the groundwater level falls is clearly visible. When meteorological data between 1973 and 2012 are examined, the total rainfall average is calculated as 458.06 mm. Between 2009 and 2016, this value has fallen to around 275 mm. Apart from that, in the Basin, in many settlements, the need for potable and usable water is also met by the wells in this area. As a result, in terms of groundwater in the region, the safe reserve was 71 hm³/year while the withdrawal amount was 158.44 hm³/year.

Considering the topographical structure, geological structure, and land use characteristics of the Altinekin Basin, it is seen that the basin has a great deal of importance for the sustainability of water resources. For this reason, it is necessary to examine the risks involved in the protection-use balance of the basin.

For the determination of these risks, rainfall, temperature and water table data for the years 2015 and 2016 were obtained from 10 wells located in the basin and coordinates were determined from the State Hydraulic Works 4th Regional Directorate. For the spatial modeling of these data, a database

was created in ArcGIS 10.3.1 software and analyzes were performed using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation technique. The changes in the groundwater level from the analyzes were evaluated with respect to the distance to the settlement, water consumption for agriculture and types of vegetable production.

3. Result and Discussion

In the Altinekin Subbasin, there are 10 wells that were measured. In the scope of the study, the well no 62564 (221) has the characteristic of being the oldest well that can be measured in the basin. Observations were made in this well from 1968 until today. It was observed that the amount of groundwater decreased by 32.17 m, according to the data from this well.

Groundwater monitoring wells should be monitored at regular intervals (monthly or quarterly) to provide useful information (Crisan and Ioan 2012). In the study, the years (2015 and 2016) in which measured values were taken at specific intervals were chosen in order to determine the change of groundwater level by creating a significant spatial model. According to the monthly data obtained from the database, the water level change in the wells is as shown in Figure 6.

Spatial modelling (IDW) analysis was conducted to examine the change in groundwater level. For this, for the years 2015 and 2016, primarily the data of the March, when water reached the maximum level,

and the data of September when it was in the minimum level were used. Differences between these data were taken and the change in groundwater level was determined (Figure 7).

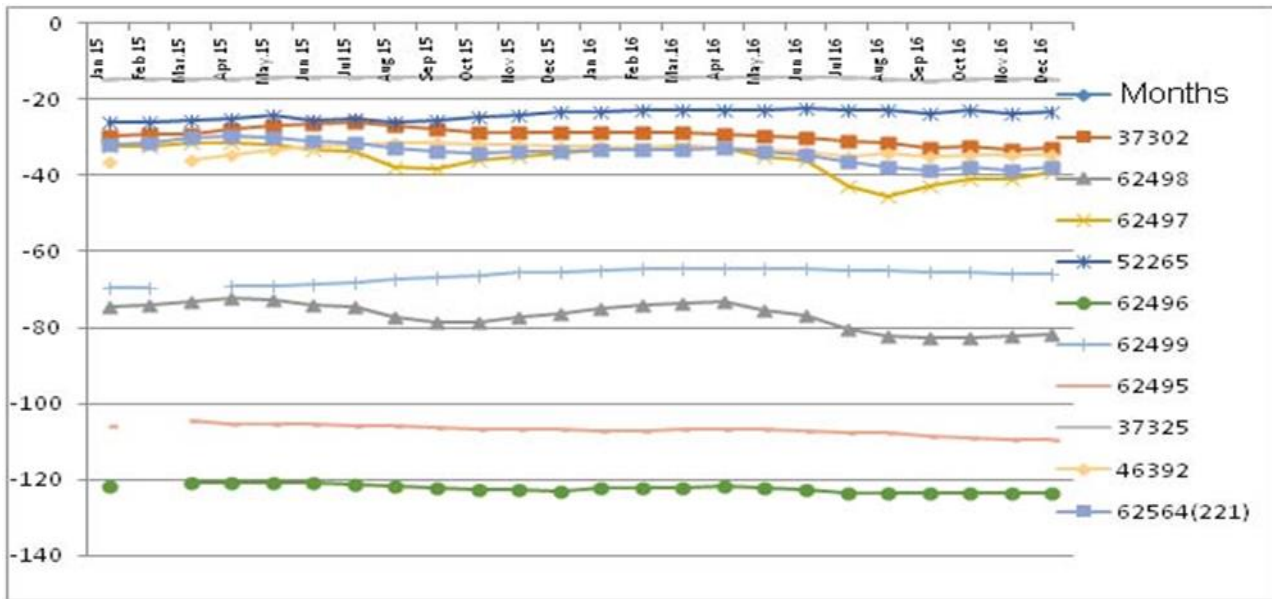


Figure 6. The water level change in wells according to the months

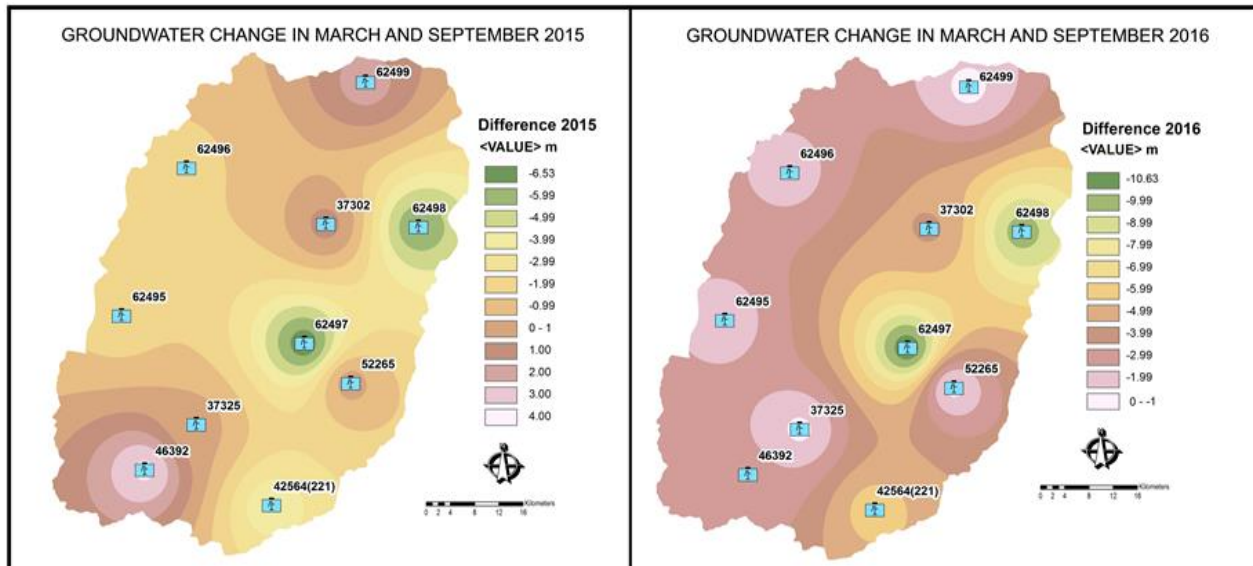


Figure 7. The groundwater change in March and September of 2015 and 2016.

When the groundwater change in March and September of 2015 was examined, a maximum reduction in the amount of groundwater was found at 6m at wells 62498 and 62497 and 3m at 42564, from which data were taken. Similarly, when the groundwater change in March and September of 2016 was examined, a maximum reduction in the amount of groundwater was found, at 10m in wells 62498 and 62497 and 5m in 42564 wells. Only in

2015, there was an increase in wells 46392 and 62499, which was not seen in 2016. When the condition of the wells is examined with the land use structure given in Figure 5, it is determined that the land around these wells has the characteristic of non-irrigable and arable area, with respect to the land use characteristics. The decrease in groundwater in these wells, observed both in March and September of 2015 and 2016, indicates that

agricultural irrigation in the summer period has drawn more water than their reserves. In addition, excessive use of groundwater resources as a result of cultivating the crops such as corn, sugar beet and sunflower, which need more water, are being

cultivated in these areas, causing water resources in the Basin to decrease (Int. Rsc. 1).

Secondly, the change between average groundwater levels between 2015 and 2016 was determined in Figure 8.

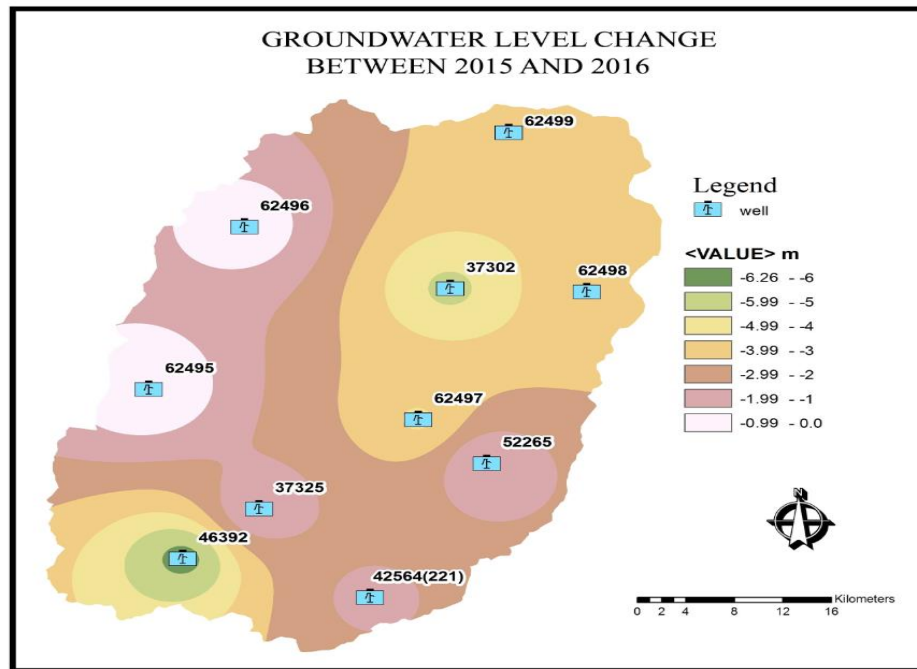


Figure 8. The change between average groundwater levels between 2015 and 2016.

According to Figure 8, it is determined that the maximum change is in the wells 37302 and 46392, where the data were taken. These wells have a slight decrease in water level during the March and September periods in 2015 and 2016, however, when the change between years is examined, this amount increases considerably. For this reason, it

can be said that these wells are influenced by other uses in the average water level changes between 2015 and 2016, apart from agricultural uses. In this context, the distances to the nearest settlements of the wells in the basin were determined and the changes in these wells were examined (Table 1).

Table 1. The distances to the nearest settlements of the wells in the Altınekin Basin

Well Number	SETTLEMENT 1		SETTLEMENT 2		SETTLEMENT 3		SETTLEMENT 4	
	Villages	Distance	Villages	Distance	Villages	Distance	Villages	Distance
37302	Höyükuyu	1.89	Tosunlar	2.03	Ayışığı	6.48	Akıncılar	8.42
37325	Çaldere	0.7	Kaleköy	3.84	Kınık	9		
42654(221)	Yazıbelen	0.7	Eğribayat	4.97	Güvenç	7.08		
46392	Kınık	2.96	Bozdağ	5.5	Biçer	6.23	Çaldere	6.85
55265	Ölmez	2.53	Sarıçköy	4.25	Altınekin	4.68		
62495	Başhüyük	9.72	Karatepe	12.48	Dedeler	14		
62496	Hodoglu	8.03	Ayışığı	9.83	Özkent	9.96		
62497	Yeniyayla	4.06	Akköy	4.41	Dedeler	5.58		
62498	Akıncılar	2.78	Höyükuyu	8.86				
62499	Kırışla	4.88	Siğircık	7.86	Karabağ	8.08		

According to Table 1, it is determined that wells 37302 and 46392, which have the greatest decrease in average groundwater levels in 2015 and 2016, are sources for more settlements than other wells in the basin. The decline in groundwater level in these wells indicates that waters are also used for daily use needs other than agricultural needs.

Finally, the change in groundwater level is examined for annual mean temperature and precipitation changes for 2015 and 2016 (Figure 9). For this, an IDW analysis was carried out that showed annual mean temperature and precipitation changes for 2015 and 2016.

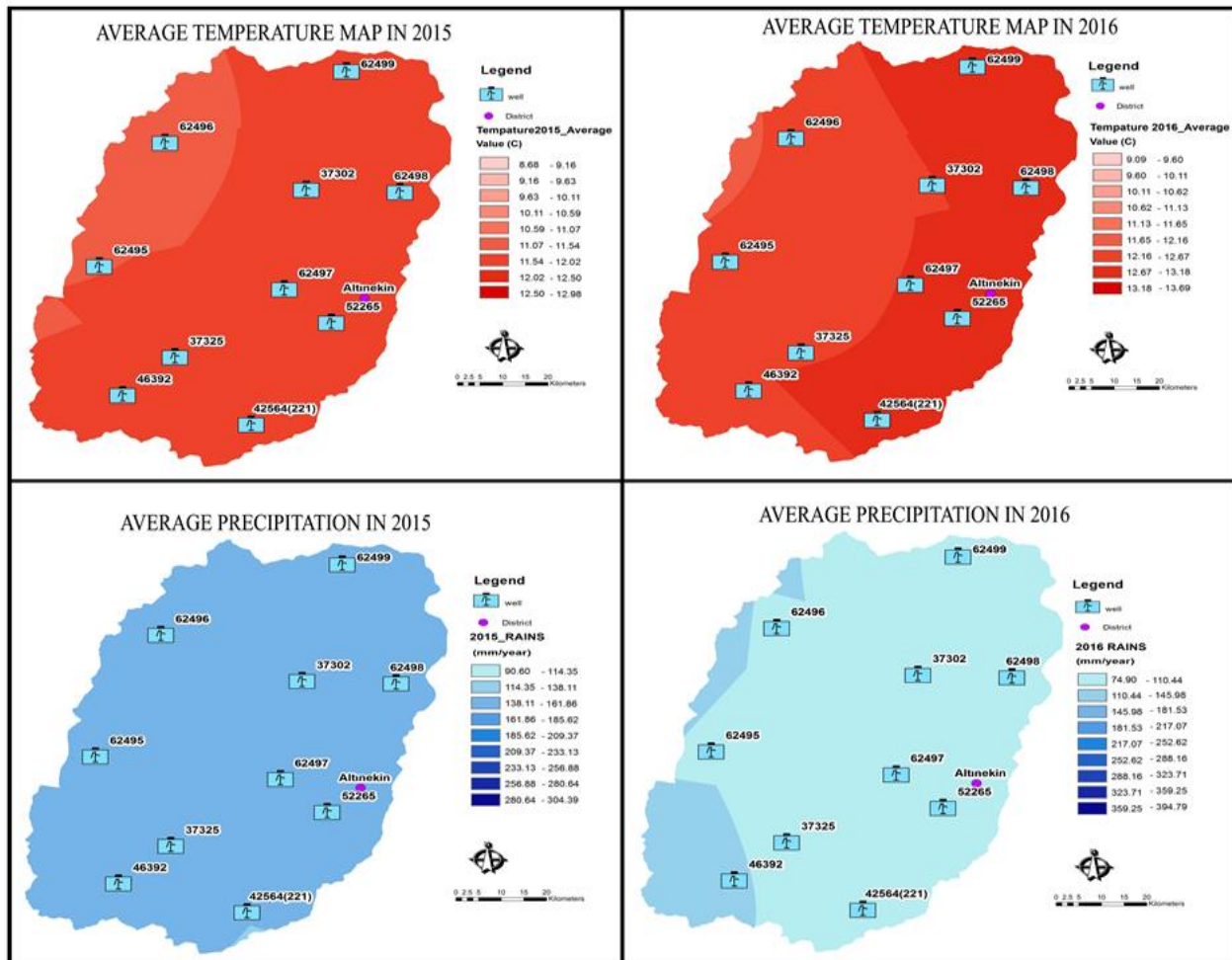


Figure 9. The annual mean temperature and precipitation changes for 2015 and 2016.

In 2015, the temperature was lower in the western part of the basin where the slope is elevated, and higher in the district center and around the villages. It has been determined that the amount of precipitation is the same for everywhere in the basin. In 2016, it was determined that temperature values increased in the whole basin and the precipitation decreased in the entire basin. According to the water table data of the year 2016, the decrease in the groundwater level in the wells is higher than the year 2015. This can be expressed as the irrigation of non-irrigable and arable land around the wells, or the reduction of the amount of

precipitation and the temperature increase that occurs in the whole basin.

4. Conclusions

Altinekin Basin, which is a subbasin of KCB, an important centre of agricultural production for Turkey, the decline in recent years in the amount of groundwater requires an analysis of the protection and use process for the sustainability of the basin's ecological balance.

Within the scope of this study, the measurements obtained from 10 observation wells in this basin were analysed with ArcGIS 10.3.1 software. In the

measurements made, the changes detected in groundwater were evaluated within the scope of land use structure, temperature, precipitation variables and distances to settlements. When the change is examined by analyses made using graphs and GIS software, changes in water level during the year and for the last 2 years have been determined. It has been determined during the years following the study that negative conditions may occur in terms of the ecological balance of the basin due to the decrease in the amount of precipitation received by the basin, the increased temperature values, the amount of groundwater drawn above the reserve for agricultural production purposes. In terms of the sustainability of groundwater resources, this study reveals:

- The necessity of monitoring and recording water level changes,
- The necessity of making rural development plans for the rural land use, plant cover, changing climatic conditions and the status of water assets,
- The fact that ecological structure needs to be protected against the driving force of the growing agricultural economy
- The fact that measures and policies need to be developed in the face of identified problems.

Effects such as the decrease in winter precipitation, increase in summer temperatures, frequent droughts and soil degradation due to climate change threaten the existence of groundwater. One of the most important effects of climate change is the change in groundwater quality. Due to climate change, the precipitation that feeds groundwater has decreased, and thus groundwater levels have fallen. As the average temperature is expected to increase rapidly in the basin after 2030, along with the decrease in the precipitation, the futures of natural life and agriculture are threatened. The importance of the water for the vital activities of living beings to be continued and the ecological continuity to be achieved is a well-known fact because it has an end and it is a sensitive resource. For this reason, for the groundwater management, the water resources need to be monitored for a certain period of time, taking the local climate, and

land conditions and characteristics into consideration. A groundwater monitoring network is established by the State Hydraulic Works by taking the opinion of the relevant institutions and organizations for monitoring activities. In this way, the amount and chemical status of groundwater and its long-term changes caused by natural conditions and human activities are determined.

5. References

- Almasri, M.N. and Kaluarachchi, J.J., 2004. Implications of on-ground Nitrogen Loading and soil Transformations on Ground Water Quality Management. *Journal of the American Water Resources Association*, **40 (1)**, 165-186.
- Anand, B., Karunanidhi, D., Subramani, T., Srinivasamoorthy, K. and Suresh, M., 2020. Long-term trend detection and spatiotemporal analysis of groundwater levels using GIS techniques in Lower Bhavani River basin, Tamil Nadu, India. *Environment, Development and Sustainability*, **22**, 2779-2800.
- Arya, S., Vennila, G. and Subramani, T., 2018. Spatial and seasonal variation of groundwater levels in Vattamalaikarai River basin, Tamil Nadu, India – A study using GIS and GPS. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, **47 (9)**, 1749-1753.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Terao, H., Kato, K. and Ohta, K., 2004. Assessment of Groundwater Contamination by Nitrate Leaching From Intensive Vegetable Cultivation Using Geographical Information System. *Environment International*, **29 (8)**, 1009–1017.
- Balasubramani, K., Gomathi, M. and Kumaraswamy, K., 2019. Evaluation of Groundwater Resources in Aiyar Basin: A GIS Approach for Agricultural Planning and Development. *Geosfera Indonesia*, **4 (3)**, 302-310.
- Başçıftçi, F., Durduran, S.S. and Inal, C., 2013. Mapping Ground Water Level With Geographic Information System (GIS) in Konya Closed Basin. *Electronic Journal of Map Technologies*, **5 (2)**, 1-15.
- Bozyiğit, R. and Tapur, T., 2009. The Affect of Groundwaters for Formation of Obruk in Konya Plain and Around. *Selçuk University Journal of Social Sciences Institute*, **21**, 137-155.

- Chandan, K.M. and Yashwant B.K., 2017. Optimization of Groundwater Level Monitoring Network Using GIS-based Geostatistical Method and Multi-parameter Analysis: A Case Study in Wainganga Sub-basin, India. *Chinese Geographical Science*, **27 (2)**, 201-215.
- Chandra, S., Singh, P.K., Tiwari, A.K., Panigrahy, B.P. and Kumar, A., 2015. Evaluation of Hydrogeological Factor and Their Relationship with Seasonal Water Table Fluctuation in Dhanbad District, Jharkhand, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **21 (2)**, 193–206.
- Crisan, M.M. and Ioan, D., 2012. Current Status of Groundwater Monitoring and Its Future in Arad. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, **13 (4)**, 2104–2111.
- Çelik, M.A., Doğantürk, I.H. and Guney, I., 2016. Investigation of Groundwater Level and Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS Plains in The South of Şanlıurfa. (UZAL-CBS 2016), Adana, 5-7 October, 381-391.
- Çelik, R. and Hamidi, N., 2018. Determination of the groundwater potential of Ergani District Plain by Geographical Information System. *DUEF Journal of Engineering*, **9 (2)**, 999-1007.
- Çıldır, M.A., Dikbaş, F., Güngör, M. and Koç, A.C., 2019. Spatial variation of groundwater levels in Denizli. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, **25 (8)**, 977-984.
- Dinka, M.O., Loiskandl, W., Furst, J. and Ndambuki, J.M., 2013. Seasonal Behavior and Spatial Fluctuations of Groundwater Levels in Long-Term Irrigated Agriculture: the Case of a Sugar Estate. *Polish Journal of Environmental Studies*, **22 (5)**, 1325-1334.
- Gossel, W., Ebraheem, A.M. and Wycisk, P., 2004. A Very Large Scale GIS-Based Groundwater Flow Model for The Nubian Sandstone Aquifer in Eastern Sahara (Egypt, northern Sudan and eastern Libya). *Hydrogeology Journal*, **12 (6)**, 698-713.
- Jha, M.K., Chowdhury, A., Chowdary, V.M. and Peiffer, S., 2007. Groundwater Management and Development by Integrated Remote Sensing and Geographic Information Systems: Prospects and Constraints. *Water Resour Manage*, **21**, 427-467.
- Jha, M.K., Chowdary, W.M. and Chowdhury, A., 2010. Groundwater Assessment in Salboni Block, West Bengal (India) Using Remote Sensing, Geographical Information System and Multi-Criteria Decision Analysis Techniques. *Hydrogeology Journal*, **18**, 1713–1728.
- Krishnaraj, S., Kumar, S. and Elango, K.P., 2015. Spatial Analysis of Groundwater Quality Using Geographic Information System - A Case Study. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, **9 (2)**, 01-06.
- Nas, B. and Berktaş, A., 2010. Groundwater Quality Mapping in Urban Groundwater Using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, **160**, 215–227.
- Okka, C.T., Bozdağ, A., Durduran, S.S. and Alkan, T., 2018. Monitoring of Groundwater Level Change with Geographical Information System, The Case of Konya Altinekin Basin.
- Papatheodorou, K., Evangelidis, K. and Ntouros, K., 2017. Geomatics for Environmental Protection and Resource Management. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, **18 (1)**, 168-180.
- Singh, P., Tiwari A.K. and Singh, P.K., 2014. Hydrochemical Characteristic and Quality Assessment of Groundwater of Ranchi Township Area, Jharkhand, India. *Current World Environment*, **9**, 804-813.
- Şen, E. and Başaran, N., 2007. Changes and Trends in Some Climate Data of Konya Plain in Global Warming Process. International Global Conference on Climate Change and Environmental Impacts, Konya.
- Tiwari, A.K., Singh, P.K., Chandra, S. and Ghosh, A., 2016. Assessment of groundwater level fluctuation by using remote sensing and GIS in West Bokaro coalfield, Jharkhand, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **22**, 59–67.
- Tiwari, K., Nota, N., Marchionatti, F. and Maio, M.D., 2017. Groundwater-Level Risk Assessment By Using Statistical and Geographic Information System (GIS) Techniques: A Case Study in The Aosta Valley Region, Italy. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **8 (2)**, 1396-1406.

Todd, D.K. and Mays, L.W., 2005. Groundwater hydrology. 3rd edition, John Wiley & Sons, 9-15.

Tsakiris, G., 2004. Water Resources Management Trends, Prospects and Limitations. Proceedings of the EWRA Symposium on Water Resources Management: Risks and Challenges for the 21st Century, Izmir, 2-4 September, 1-6.

Ustun, A., Tusat, E. and Abbak, R.A., 2007. Groundwater Withdrawal in Konya Closed Basin and Geodetic Monitoring of Possible Consequences. 3. Engineering Measurements Symposium, Konya, 24 -26 October, 52-61.

Verma, D.K., Bhunia, G.S., Shit, P.K., Kumar, S., Mandal, J. and Padbhushan, R., 2017. Spatial Variability of Groundwater Quality of Sabour block, Bhagalpur district (Bihar, India). *Applied Water Science*, **7 (4)**, 1997-2008.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris: UNESCO.

Yilmaz, M., 2010. Environmental Problems Caused by Ground Water Level Changes Around Karapinar. *Ankara University Journal of Environmental Sciences*, **2 (2)**, 145-163.

Internet Resources

Int. Rsc. 1-

http://d2hawiim0tjbd8.cloudfront.net/downloads/konya_da_suyun_bugnu_raporu.pdf, (03.03.2018)

Int. Rsc. 2-

<http://www.cem.gov.tr/erozyon/Files/moduller/havza/turkiyedekisuhavzalari.pdf>, (03.03.2018)

Int. Rsc. 3-

<http://corine.ormansu.gov.tr/corineportal/kapsam.html>, (03.03.2018)

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035503 (632-639)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035503 (632-639)

DOI: 10.35414/akufemubid.889211

Araştırma Makalesi / Research Article

Kitle Kaynaklı Fotoğraflar Kullanılarak Kültürel Mirasın Üç Boyutlu Modellenmesi ve Web Tabanlı Görselleştirilmesi: Afrodiasias - Tetrasyon Örneği

Ahmet USLU^{1*}, Murat UYSAL²¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Kütahya.²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.Sorumlu yazar e-posta: ahmet.uslu1@dpu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8745-423X>e-posta: muysal@aku.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5202-4387>

Geliş Tarihi: 01.03.2021

Kabul Tarihi: 17.06.2021

Öz

Günümüzde akıllı telefonların, mobil internetin ve sosyal medyanın yaygın kullanımı ile birlikte turistler, müzeleri ve kültürel miras alanlarını ziyaret ederken çektikleri fotoğrafları çeşitli sosyal medya platformlarında paylaşmaktadır. Kitle kaynaklı bu fotoğraflar, kültürel miras alanındaki çeşitli araştırmalarda önemli bir bileşen haline gelmiştir. Sosyal medya platformları, kültürel mirasın dijital dokümantasyonu için veri kaynağı olarak kullanılabilir zengin bir fotoğraf koleksiyonu sağlamaktadır. Kültürel mirasın kitle kaynak kullanımı tabanlı dijitalleştirilmesi fotogrametri tekniği ile gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Flickr'da paylaşılan fotoğraflara dayalı olarak kültürel mirasın fotogrametrik tekniklerle üç boyutlu (3B) dijital dokümantasyonunu sağlamak ve 3B modeli web tabanlı görselleştirmek için bilimsel bir iş akışı ve yöntem oluşturulmuştur. Önerilen iş akışı, Afrodiasias Antik Kenti'ndeki Tetrasyon yapısına uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, sosyal medya platformlarında paylaşılan kitle kaynaklı fotoğrafların, kültürel mirasın 3B dokümantasyonu ve 3B modelin web tabanlı görselleştirilmesi için veri kaynağı olarak uygunluğunu göstermektedir. Ayrıca kitle kaynaklı fotogrametik modeller, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, karma gerçeklik ve 3B baskı teknolojileri aracılığıyla etkileşimli deneyimlerin sağlanması için yeni fırsatlar sunmaktadır.

Anahtar kelimeler

Kültürel miras; Kitle kaynak kullanımı; Flickr; 3B modelleme; Web tabanlı görselleştirme

Three-Dimensional Modeling and Web-Based Visualization of Cultural Heritage Using Crowdsourced Photos: The Case of Aphrodisias - Tetrasyon

Abstract

Today, with the widespread use of smartphones, mobile internet and social media, tourists share photos taken while visiting museums and cultural heritage sites on various social media platforms. These crowdsourced photographs have become an important component in various research in the field of cultural heritage. Social media platforms provide a rich collection of photographs that can be used as a data source for digital documentation of cultural heritage. Crowdsourcing-based digitisation of cultural heritage can be achieved by photogrammetry technique. In this study, a scientific workflow and method was created to provide three-dimensional (3D) digital documentation of cultural heritage using photogrammetric techniques based on photos shared on Flickr and to visualize the 3D model web based. The proposed workflow was applied to the Tetrasyon structure in the ancient City of Aphrodisias. The results of the study show the suitability of crowdsourced photos shared on social media platforms as a data source for 3D documentation of cultural heritage and web based visualization of the 3D model. Moreover, crowdsourced photogrammetric models offer new opportunities to provide interactive experiences through augmented reality, virtual reality, mixed reality and 3D printing technologies.

Keywords

Cultural heritage; Crowdsourcing; Flickr; 3D modeling; Web based visualization

1. Giriş

Kültürel miras tarihsel, sosyal ve antropolojik değerlere sahip sürdürülebilir kalkınmanın bir sağlayıcısı olarak kabul edilmektedir (Kurin 2004). 2013 yılında Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü (UNESCO), kültürün sürdürülebilir kalkınma politikalarının merkezinde olması gerektiğini ilan etmiştir (Xiao *et al.* 2018). Daha sonra, Kasım 2015'te, UNESCO Dünya Mirası Sözleşmesi 20. Taraf Devletler Genel Kurulu, sürdürülebilir kalkınma perspektifinin Dünya Mirası Sözleşmesi süreçlerine entegrasyonu konusunda bir politika kabul etmiştir (Xiao *et al.* 2018). Büyük önemine rağmen kültürel miras, genellikle insan çatışmaları, şehirleşme, afet, kötü turizm yönetimi gibi hem doğal hem de insan kaynaklı tehditlerin altındadır (Hosagrahar *et al.* 2016). Bu sebeplerden dolayı kültürel mirasın belgelenmesi daha acil hale gelmiştir (Remondino and El-Hakim 2006).

Dünyanın dört bir yanındaki sayısız kültürel miras alanının belgelenmesi, önemli miktarda mali ve işgücü kaynağı gerektiren devasa bir projedir (Dhonju *et al.* 2017). Kültürel mirasın sayısallaştırılması ve belgelendirilmesi süreçlerine toplum veya vatandaş katılımı, kültürel mirasın korunmasına önemli ölçüde katkı sağlayabilir (Oomen and Aroyo 2011). Bu bağlamda, kitle kaynak kullanımı, dünyanın her yerinden kültürel miras verilerinin toplanmasını sağlamak için ideal bir tekniktir (Dhonju *et al.* 2017).

Akıllı telefonların ve mobil uygulamaların gelişmesiyle birlikte kitle kaynak kullanımı, geniş bir faaliyet yelpazesinde veri toplamak ve paylaşmak için ortak bir paradigma haline gelmiştir (Feng *et al.* 2014). Özellikle, çevrimiçi fotoğraf paylaşım uygulamalarında (Flickr, Panoramio, Instagram ve Strava) ve sosyal ağlarda (Twitter, Facebook ve VK.com) depolanan, herkese açık konuma dayalı kitle kaynaklı sosyal medya verilerinin (çoğunlukla coğrafi etiketli fotoğraflar) kullanımı çoğalmıştır (Hausmann *et al.* 2018). Sosyal medya platformları özel Uygulama Programlama Arayüzleri (API) sayesinde, kültürel mirasın fotogrametrik tekniklerle 3B modellenmesi için veri kaynağı olarak kullanılabilir yüksek çözünürlüklü fotoğraflar sağlamaktadır (Dhonju *et al.* 2018).

Çalışmada Flickr'da paylaşılan kitle kaynaklı fotoğrafların, kültürel mirasın 3B modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi için veri kaynağı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, Python tabanlı API'ler kullanarak Flickr'dan kültürel mirasın fotoğraflarının elde edilmesi, Hareket ile Nesne Oluşturma (SFM) ve görüntü eşleştirme tekniklerini kullanarak 3B yoğun nokta bulutlarının oluşturulması ve 3B modelin web tabanlı görselleştirilmesi için bir metodoloji sunulmuştur. Önerilen iş akışı, Aydın ili, Karacasu ilçesinde yer alan Afrodiasias Antik Kenti'ndeki Tetrasyon yapıasına uygulanmıştır. Tetrasyon yapısının zemin ölçümleri ve ayrıntılı geometrik dokümantasyonu yapılamadığından, bu çalışmanın sonuçları sadece 3B görselleştirme ve bilgi amaçlı kullanılabilir.

Çalışma beş bölüm halinde düzenlenmiştir. Giriş bölümünün (Bölüm 1) ardından, Bölüm 2'de kültürel mirasın 3B dijital dokümantasyonu için kitle kaynak kullanımı konseptini içeren çalışmalara ilişkin ayrıntılı literatür özeti yer almaktadır. Bölüm 3'te; çalışma alanının genel özellikleri, çalışmada kullanılan materyaller ve çalışmanın yöntemi sunulmaktadır. 4. Bölüm; fotogrametrik değerlendirme, 3B seyrek ve yoğun nokta bulutu oluşturma, 3B modelleme ve Web tabanlı görselleştirme uygulamalarını içermektedir. Son olarak Bölüm 5'te ise; çalışmanın sonuçları, öneriler ve gelecekteki çalışmalar belirtilmiştir.

2. Literatür Özeti

Kültürel mirasın dokümantasyonu için kitle kaynak kullanımı konseptini kullanan bazı çalışmalar yapılmıştır. Somogyi vd. (2016) çalışmalarında, Budapeşte kentindeki 3 antik yapının Flickr platformunda paylaşılan fotoğraflarını API'ler kullanarak elde etmişler ve SFM tekniği ile 3B modellerini oluşturmuşlardır. Oluşturulan 3B modeller, yersel lazer tarama verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kültürel mirasın dokümantasyonu ve görselleştirilmesi için kitle kaynaklı fotoğrafların potansiyel veri kaynağı olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir. Dhonju vd. (2018), kültürel miras alanlarını belgelemek ve paylaşmak için "Kültürel Mirasımızı Paylaşın" isminde web ve mobil tabanlı bir kitle kaynak platformu geliştirmiştir. Çalışmanın temel amacı,

kolay erişilemeyen ve uzak yerlerdeki kültürel miras alanlarını belgelemek için halkın katılımını teşvik etmektir. Platform, coğrafi konumlu kültürel mirasın görüntülerini bir web arayüzü aracılığıyla halktan toplamayı, aynı zamanda toplanan görüntülerden web tabanlı 3B model oluşturmayı ve 3B modeli görselleştirmeyi desteklemektedir. Alsadik (2020), kültürel miras alanlarının dokümantasyonu için amatörler tarafından çekilen kitle kaynaklı drone görüntülerini ve videolarını kullanma fikrini önermiştir. Araştırmada kitle kaynaklı drone videoları kullanılarak Irak'ta yer alan risk altındaki Rabban Hormizd Manastırı, Taq Kasra yapısı ve Büyük Samarra Camii'nin 3B modelleri oluşturulmuştur. Araştırmanın sonucunda kültür varlıklarına ait web üzerinden paylaşılan kitle kaynaklı drone videolarının, bu eserlerin 3B dokümantasyonu için potansiyel bir veri kaynağı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kitle kaynaklı fotogrametrik araştırmalar, afetler, yangınlar ve savaşlar neticesinde yok olan kültürel mirasın dijital görselleştirilmesi için eşsiz bir fırsat sunmaktadır (Stathopoulou *et al.* 2015). Vincent vd. (2015) Musul Müzesi'ndeki kültür varlıklarının tahrip edilmesi nedeniyle, bu eserlerin yeniden 3B olarak yapılandırılmasını sağlamak amacıyla Rekrei projesini gerçekleştirmişlerdir. Proje kapsamında kültürel miras nesnelere ait görüntüleri, gönüllü katılımcılar tarafından web sitesi aracılığıyla toplanmıştır. Bu görüntüler SFM algoritmaları ile işlenerek, tahrip edilmiş eserlerin 3B temsilleri oluşturulmuştur. Stathopoulou vd. (2015) Yunanistan'da 2015 yılında yıkılan, yaklaşık 150 yıllık taş köprü'nün 3B temsili oluşturmak için köprü'nün fotoğraflarını veya videolarını toplayabilecekleri kitle kaynaklı bir platform tasarlamışlardır. Kullanıcılar tarafından platforma 470 adet resim ve 15 adet video yüklenmiştir. Toplanan veriler SFM algoritmaları ile işlenerek, taş köprü'nün görsel 3B temsili başarılı bir şekilde oluşturulmuştur.

3. Materyal ve Metot

3.1 Çalışma Alanı ve Çalışmanın Materyalleri

Çalışmada Aydın ili, Karacasu ilçesi, Geyre Mahallesi sınırları içinde yer alan ve Unesco Dünya Mirası Listesine alınan Afrodisias Antik Kenti'nin simge

yapılarından Tetrapylon, model olarak seçilmiştir (Şekil 1). M.S. 2. Yüzyılda Antoninler tarafından inşa edilen Tetrapylon, Aphrodite Kutsal Alanının anıtsal giriş kapısıdır (Int Kyn. 1). Yapıda mimari olarak çok zengin tarzlar bir arada kullanılmıştır (Int Kyn. 1). Antik yapının her iki tarafında gösterişli alınlıkları ve bu alınlıkları destekleyen düz, yivli ve spiral yivli olmak üzere on altı adet sütunu bulunmaktadır (Int Kyn. 2). Tetrapylon zamanla yıkılmıştır. Restorasyon çalışmaları ile yapının birebir rekonstrüksiyonu, kazı çalışmalarında bulunan orijinal bloklar kullanılarak 1991 yılında tamamlanmıştır (Int Kyn. 2).

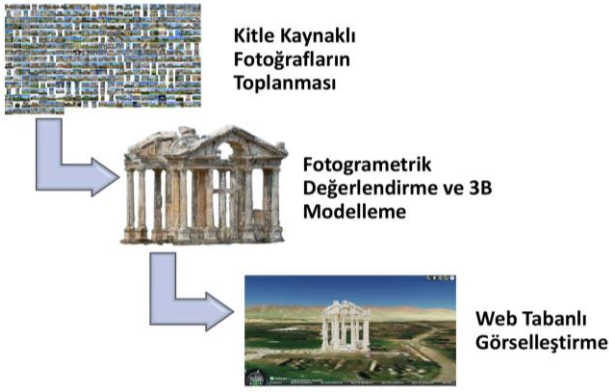


Şekil 1. Tetrapylon yapısı (Int Kyn. 1).

Çalışmada materyal olarak, Flickr platformunda ziyaretçiler tarafından paylaşılan Tetrapylon'un fotoğrafları, fotogrametrik değerlendirme işlemleri ve 3B model oluşturma işlemleri için VisualSFM ve Meshlab yazılımları, web tabanlı görselleştirme işlemleri için JavaScript 3B kütüphanesi ve Cesium Ion platformu kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

Uygulamada izlenen yöntem Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın yöntemi.

4. Uygulama

4.1 Kitle Kaynaklı Fotoğrafların Toplanması

Flickr, kullanıcıların fotoğraf ve videolarını paylaşabilecekleri ve bu paylaşımlara coğrafi etiket uygulayabilecekleri ücretsiz bir sosyal ağ platformudur (Int Kyn. 3). Flickr, özel API'leri aracılığıyla verilerine ücretsiz ve açık erişim imkânı sunmaktadır (Int Kyn. 3). Afrodisias Antik Kenti'nin, platformda "Afrodisias" olarak etiketli 3052 adet fotoğrafı, Flickr API'leri aracılığıyla bir python komut dosyası kullanılarak orijinal boyutlarında indirilmiştir. Bu işlem yaklaşık 2 saat sürmüştür. 3052 adet fotoğraftan oluşan veri seti Afrodisias Antik Kent içerisinde yer alan Tetrapylon, Tiyatro, Tapınak, Piskoposluk Sarayı ve Agora yapılarının fotoğraflarını içermektedir. Fotoğraf koleksiyonun içinden sadece Tetrapylon'u içeren 375 adet fotoğraf seçilerek çalışma klasörüne kaydedilmiştir. Kullanıcılar tarafından çeşitli kameralarla çekilen farklı açı ve çözünürlükteki fotoğraflar Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Tetrapylon'un kitle kaynaklı fotoğrafları.

4.2. Fotogrametrik Değerlendirme ve 3B Modelleme

Bu aşamada nokta bulutu oluşturma işlemleri için VisualSFM, mesh ve doku oluşturma işlemleri için Meshlab yazılımı kullanılmıştır. VisualSFM, Changchang Wu tarafından geliştirilmiş, 3B modelleme için SFM tekniğini kullanan açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Yazılım, CMVS/PMVS araçlarının çalışmasına imkân sağlayan bir arayüz içermektedir (Int Kyn. 4). VisualSFM yazılımında görüntülerden nesnelerin yeniden yapılandırılması işlemi, sırasıyla özellik algılama ve eşleştirme, hizalama, demet dengelemesi, seyrek ve yoğun nokta bulutlarının oluşturulması adımlarını içermektedir (Demirel ve Şeker 2015).

Öncelikle 375 adet kitle kaynaklı fotoğraf yazılıma aktarılmıştır. Fotoğraflar, SIFT (Ölçek Değişmez Unsur Dönüşümü) algoritması (Lowe 1999) ile kendi aralarında eşleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. SIFT aracılığıyla oluşturulan özellik vektörlerinin bir örneği.

Sonraki aşamada, seyrek nokta bulutu (Şekil 5) ve seyrek nokta bulutuna bağlı olarak yoğun nokta bulutu (Şekil 6) oluşturulmuştur.



Şekil 5. Seyrek nokta bulutu, kamera konumları ve yönleri.



Şekil 6. Yoğun nokta bulutu.

Oluşturulan model, mesh ve doku oluşturma işlemleri için Meshlab yazılımında işlenmek üzere “nvm” ve “ply” formatlarında kaydedilmiştir. Meshlab, nokta bulutlarından mesh ve doku oluşturma işlemleri gerçekleştirilebilen özgür ve açık kaynak kodlu bir yazılımdır (Cignoni *et al.* 2008).

VisualSFM yazılımı ile oluşturulan model Meshlab yazılımına aktarılmış ve bozuk nokta bulutları temizlenerek Tetrapylon'un 3B dokulu modeli elde edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Tetrapylon'un 3B modeli.

Bu işlemin ardından, dijital model Web'te etkileşimli 3B görselleştirme uygulamalarında kullanılmak

üzere “.obj” uzantılı model dosyası olarak kaydedilmiştir.

4.3 Web'de Etkileşimli 3B görselleştirme

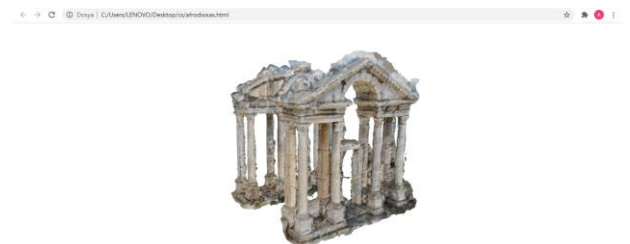
3B etkileşimli görselleştirme ve web teknolojilerindeki son gelişmeler, kültürel mirasın korunmasına, uzun vadede saklanmasına ve yaygınlaştırılmasına önemli katkılar sağlamıştır (Nishanbaev 2020).

Bu aşamada Tetrapylon'un internet tarayıcısı ve sanal Dünya üzerinde web tabanlı 3B görselleştirme konseptini içeren iki uygulama gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, modern masaüstü ve mobil web tarayıcılarında çalışmak için herhangi bir eklentiye ihtiyaç duymayan, Hiper Metin İşaretleme Dili (HTML5) ve Web Grafik Kütüphanesi (WebGL) tabanlı bir 3B görselleştirme sağlayan JavaScript 3B (Three.js) kütüphanesine (Int Kyn. 5) dayalı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Tetrapylon'un web sayfasında 3B gösterimi için gerekli JavaScript kodları Notepad++ programında yazılarak, HTML dosyası olarak kaydedilmiştir (Şekil 8).

```
C:\Users\LENOVO\Desktop\afrodissias.html - Notepad++
Dosya Düzenle Ara Görünüm Kodlama Diller Ayarlar Araçlar Makrolar Çalıştır Eklentiler Penceler ?
afrodissias.html
1 <!DOCTYPE HTML>
2 <HTML>
3 <HEAD>
4 <TITLE>Loader</TITLE>
5 <script type="text/javascript" src="jse3d.js"></script>
6 <script type="text/javascript" src="jse3d.webgl.js"></script>
7 <script type="text/javascript" src="jse3d.tomb.js"></script>
8 </HEAD>
9
10 <BODY>
11 <div style="width:800px; margin:auto; position:relative;">
12 <canvas id="cv" style="left:-300px; top:20px; position:absolute;" width="1370" height="900">
13 It seems you are using an outdated browser that does not support canvas :-{
14 </canvas>
15 </div>
16
17 <script type="text/javascript">
18 var viewer = new JSC3D.Viewer(document.getElementById("cv"));
19 viewer.setParameter('SceneUrl', 'afrodissias.obj');
20 viewer.setParameter('InitRotationX', -90);
21 viewer.setParameter('InitRotationY', 0);
22 viewer.setParameter('InitRotationZ', 0);
23 viewer.setParameter('ModelColor', '#CAA618');
24 viewer.setParameter('BackgroundColor1', '#6699FF');
25 viewer.setParameter('BackgroundColor2', '#339966');
26 viewer.setParameter('RenderMode', 'texture');
27 viewer.setParameter('Renderer', 'webgl');
28 viewer.init();
29 viewer.update();
30 </script>
31 </BODY>
32 </HTML>
```

Şekil 8. Web sayfasında 3B model görüntüleyici Three.js, WebGL kodlar.

HTML dosyasının çalıştırılmasıyla Tetrapylon'un 3B modeli web sayfasında görselleştirilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Tetrapylon'un 3B modelinin web tarayıcısında görselleştirilmesi.

Web tabanlı görselleştirme aracı, 3B modeli X, Y ve Z koordinat eksenleri boyunca yakınlaştırma, kaydırma ve döndürme gibi birkaç temel işlemi desteklemektedir. 3B model masaüstü ve mobil web tarayıcılarında (Google Chrome, Mozilla Firefox, Internet Explorer, Safari ve Opera) eklentilere ihtiyaç duymadan sorunsuz çalışmaktadır.

Sanal Dünya tabanlı 3B görselleştirme, kullanıcıların 3B sanal ortamda coğrafi verilerle etkileşime girmesine imkân sağlayan, ideal bir görselleştirme ortamı olarak tanımlanmıştır (Yu and Gong 2012).

İkinci olarak Tetrapylon'un ve çevresindeki manzaraların 3B gösterimi ve keşfi için sanal dünya platformu Cesium Ion kullanılmıştır. Cesium Ion, etkileşimli 3B küreler ve haritalar oluşturmak için geliştirilmiş açık kaynaklı bir yazılımdır (Int Kyn. 6). Cesium Ion, birçok 3B model dosyası format türlerini desteklemektedir (Int Kyn. 6).

Tetrapylon'un 3B modelinin web tabanlı sunumu için optimize edilmek üzere model dosyaları kullanıcı hesabı ile Cesium Ion platformuna yüklenmiştir. 3B model coğrafi referanslı olmadığı için, platformun konum düzenleyici araçları kullanılarak, 3B model yerküre üzerindeki konumuna yerleştirilmiştir. Şekil 10'da Tetrapylon'un 3B modelinin Cesium Ion ortamında web tabanlı sunumu gösterilmektedir.



Şekil 10. Tetrapylon'un 3B modelinin Cesium Ion ortamında web tabanlı görselleştirilmesi.

Cesium Ion yakınlaştırma, kaydırma ve döndürme işlevleri ile sanal dünya üzerinde gezinme gibi çoklu etkileşimleri mümkün kılmaktadır. Ayrıca Cesium Ion, kullanıcıların 3B görselleştirmeyi başka herhangi bir web sayfasına entegre etmesine de imkân sağlamaktadır.

Uygulamalar, WebGL standartına dayalı 3B kültürel miras modellerinin web üzerinde görselleştirilmesi potansiyelini keşfetmemizi sağlamıştır.

5. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Kitle kaynaklı veriler, kültürel miras alanındaki çeşitli araştırmalarda önemli bir bileşen haline gelmiştir. Bu çalışmada, kitle kaynaklı fotoğraflara dayalı olarak kültürel mirasın fotogrametrik tekniklerle 3B dijital dokümantasyonunun oluşturulması ve 3B modelin web tabanlı görselleştirilmesi için bir iş akışı geliştirilerek uygulanmıştır. Bu kapsamda Afrodisias Antik Kenti'nde yer alan Tetrapylon yapısının Flickr platformunda paylaşılan fotoğrafları Python tabanlı API'ler kullanarak elde edilmiştir. Fotoğraflar SFM ve görüntü eşleştirme teknikleri ile işlenerek, Tetrapylon'un 3B yoğun nokta bulutu ve 3B modeli oluşturulmuştur. Son olarak Tetrapylon'un 3B modeli, etkileşimli keşfi için web ortamında görselleştirilmiştir.

Çalışmada, yapının üst ve iç yüzeylerine ait yeterince fotoğraf bulunmadığından, bu yüzeylerin bazı kısımlarının nokta bulutlarında boşluklar olduğu görülmüştür. Bu sorunun çözümü için farklı sosyal medya platformlarında paylaşılan yerden veya havadan çekilmiş görüntüler ve videolar kullanılarak çalışmamızdaki nokta bulutunun iyileştirilmesi sağlanabilir. Sosyal medya platformlarından Facebook ve Instagram, 2019 yılı itibarıyla gizlilik politikaları gereği veri paylaşımını durdurmuştur. Hiçbir yazılım, paket ya da ara yüzle bu platformlardan veri sağlanamamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmanın sınırlılıklarından birisi yaygın olarak kullanılan diğer sosyal medya uygulamalarından fotoğraf verilerinin elde edilememiş olmasıdır.

Tetrapylon zemin ölçümleri ve ayrıntılı geometrik dokümantasyonu yapılmadığından 3B modelin doğruluğu test edilememiştir. Bu nedenle 3B model sadece görselleştirme ve bilgi amaçlı kullanılabilir. Araştırmanın sonuçları, sosyal medya platformlarında paylaşılan kitle kaynaklı fotoğrafların, kültürel mirasın 3B dokümantasyonu için veri kaynağı olarak uygunluğunu göstermiştir.

Çalışmada tanımlanan yaklaşım ve çalışmanın sonuçları göz önünde bulundurularak geleceğe dönük birtakım öneriler getirilmiştir:

- Çalışma alanından veri toplama her zaman mümkün olmadığından, eksik veri sorununun üstesinden gelmek için kitle kaynaklı görüntüler, kültürel mirasın görsel bir temsilini oluşturmak için kullanılabilir.
- Kültür varlıklarının farklı zamanlarda çekilmiş kitle kaynaklı fotoğrafları kullanılarak yapı üzerindeki herhangi bir şekil veya renk değişikliğine bağlı hasarları görselleştirmek mümkün hale gelebilir.
- Kültürel mirası belgelemeyi ve dünya çapında paylaşmayı amaçlayan mobil tabanlı coğrafi kitle kaynak platformları geliştirilerek, halkın katılımcı deneyimleri artırılabilir.
- Sosyal medya platformlarında paylaşılan havadan veya yerden çekilen kitle kaynaklı fotoğraflar ve video görüntüleri, savaşlar, doğal afetler, terörizm vb. gibi nedenlerden dolayı erişilemeyen kültür varlıklarının 3B modellerini oluşturmak için kullanılabilir.
- Kitle kaynaklı fotogrametik 3B modellerin artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik ve karma gerçeklik teknolojilerine entegrasyonu sağlanarak, kültürel miras alanları sanal ortamlara dönüştürülebilir.
- Kültürel mirasın kitle kaynaklı fotogrametik 3B modellerinin, 3B baskı teknolojileri aracılığıyla farklı ölçeklerde replikaları ve dokunsal temsilleri oluşturulabilir.

Gelecek çalışmalarda kültürel mirasın etkileşimli sunumu ve ayrıntılı keşfi için kitle kaynak kullanımı tabanlı fotogrametik verilerin, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, karma gerçeklik ve 3B baskı teknolojilerine entegrasyonun sağlandığı çok modlu erişilebilir uygulamalar gerçekleştirilecektir.

Teşekkür

Verilerini ücretsiz olarak sağladıkları için Flickr, VisualSFM, Meshlab, ThreeJS ve Cesium platformlarına teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Alsadik, B., 2020. Crowdsourced Drone Imagery—A Powerful Source for the 3D Documentation of Cultural Heritage at Risk. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-12.

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F. and Ranzuglia, G., 2008. Meshlab: an open-source mesh processing tool. *ERCIM News*, **73**, 45-46.

Demirel, H. ve Şeker, D. Z., 2015. Fotogrametrik Açık Kaynak Kodlu Yazılımlar: Yeni Bir Dönem, TUFUAB VIII. Teknik Sempozyumu, 21-23 Mayıs 2015, Konya.

Dhonju, H. K., Xiao, W., Shakya, B., Mills, J. P. and Sarhosis, V., 2017. Documentation of heritage structures through geo-crowdsourcing and web-mapping. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, 17-21.

Dhonju, H. K., Xiao, W., Mills, J. P. and Sarhosis, V., 2018. Share Our Cultural Heritage (SOCH): worldwide 3D heritage reconstruction and visualization via web and mobile GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7(9)**, 360.

Feng, Z., Zhu, Y., Zhang, Q., Zhu, H., Yu, J., Cao, J. and Ni, L. M., 2014. Towards truthful mechanisms for mobile crowdsourcing with dynamic smartphones. *IEEE 34th International Conference on Distributed Computing Systems*, 11-20.

Hausmann, A., Toivonen, T., Slotow, R., Tenkanen, H., Moilanen, A., Heikinheimo, V. and Di Minin, E., (2018). Social media data can be used to understand tourists' preferences for nature-based experiences in protected areas. *Conservation Letters*, **11(1)**, e12343.

Hosagrahar, J., Soule, J., Girard, L. F. and Potts, A., 2016. Cultural heritage, the UN sustainable development goals, and the new urban agenda. *BDC. Bollettino Del Centro Calza Bini*, **16(1)**, 37-54.

Kurin, R., 2004. Safeguarding Intangible Cultural Heritage in the 2003 UNESCO Convention: a critical appraisal. *Museum international*, **56(1-2)**, 66-77.

Lowe, D. G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*, **2**, 1150-1157.

Nishanbaev, I., 2020. A web repository for geo-located 3D digital cultural heritage models. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, **16**, e00139.

Oomen, J. and Aroyo, L., 2011. Crowdsourcing in the cultural heritage domain: opportunities and challenges. In *Proceedings of the 5th International Conference on Communities and Technologies*, 138-149.

Remondino, F. and El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, **21(115)**, 269-291.

Somogyi, A., Barsi, A., Molnar, B. and Lovas, T., 2016. Crowd sourcing based 3d modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **41(B5)**, 587–590.

Stathopoulou, E. K., Georgopoulos, A., Panagiotopoulos, G. and Kaliampakos, D., 2015. Crowdsourcing Lost Cultural Heritage. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **2**, 295-300.

Vincent, M. L., Gutierrez, M. F., Coughenour, C., Manuel, V., Bendicho, L. M., Remondino, F. and Fritsch, D., 2015. Crowd-sourcing the 3D digital reconstructions of lost cultural heritage. In *2015 Digital Heritage*, **1**, 171-172.

Yu, L. and Gong, P., 2012. Google Earth as a virtual globe tool for Earth science applications at the global scale: progress and perspectives. *International Journal of Remote Sensing*, **33(12)**, 3966-3986.

Xiao, W., Mills, J., Guidi, G., Rodríguez-González, P., Barsanti, S. G., and González-Aguilera, D., 2018. Geoinformatics for the conservation and promotion of cultural heritage in support of the UN Sustainable Development Goals. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **142**, 389-406.

İnternet kaynakları

1-<https://aydin.ktb.gov.tr>, (10.02.2021)

2-<https://kvmgm.ktb.gov.tr>, (10.02.2021)

3- <https://www.flickr.com/explore>, (10.02.2021)

4- <http://ccwu.me/vSFM>, (20.02.2021)

5- <https://threejs.org>, (21.02.2021)

6- <https://cesium.com>, (21.02.2021)

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035504 (640-649)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035504 (640-649)

DOI: 10.35414/akufemubid.851780

Araştırma Makalesi / Research Article

Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Uygulamalarında Kamera ve Sistem Kalibrasyonunun Ölçüm Doğruluklarına Etkisi

Temel DURGUT^{1*}, Erdem Emin MARAŞ²¹ Harita Genel Müdürlüğü, Fotogrametri Dairesi, Ankara.² Samsun Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Samsun.

Sorumlu yazar e-posta: tdurgut@gmail.com.

e-posta: erdem.maras@samsun.edu.tr.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9881-339X>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5205-1622>

Geliş Tarihi: 01.01.2021

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Klasik cerrahi yöntemlerin taşıdığı riskleri ve cerrahi müdahale sürelerini en aza indirmek için günümüz teknolojik gelişmelerine paralel olarak fotogrametrik cerrahi uygulamalar gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır. Cerrahi müdahalenin yapılacağı bölgenin tamamen açılmasına ihtiyaç duyulmayan durumlarda belirlenen uygun bir noktadan giriş yapmak suretiyle kısa sürede ve daha güvenli cerrahi işlemler yapılabilmektedir. Cerrahi navigasyonda; standart bir ölçü biriminde tanımlı bir altlık üzerinde (MR, Tomografi, vb.), belirli periyotlarla takip edilen, 3 Boyutlu (3B) konumları belirlenen ve ulaşılmak istenen bir konuma yönlendirilen hareketli sondalar kullanılmaktadır. Söz konusu sondaların 3B hareketlerinin yüksek doğruluklarla ve gerçek zamanlı olarak konumlandırılabilmesi için kullanılan stereo kameraların fotogrametrik olarak kalibrasyona tabi tutulması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında söz konusu kalibrasyonların sistemin konumlandırılabilirliğine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kameralara ait iç yönelme parametreleri ve sabit olan stereo kamera bazı ileri dengeleme teknikleri kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Çalışmada, sorumlu yazar tarafından 2014 yılından bu yana geliştirilmekte olan "Stereo Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Yazılımı" ve "Fotogrametrik Kamera Kalibrasyon Yazılımı" kullanılmıştır. Çalışma neticesinde; kalibrasyonu yapılmış sistem bileşenlerinin, gerçek zamanlı 3B konum doğruluğunu 2-3 mm seviyelerinden 0,2 mm seviyelerine çektiği görülmüş ve ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Anahtar kelimeler

Cerrahi navigasyon;
Yersel fotogrametri;
Kamera kalibrasyonu;
EKK dengeleme;
Konum doğruluğu

Camera and System Calibration Effects on Measurement Accuracies in Photogrammetric Surgical Navigation Applications

Abstract

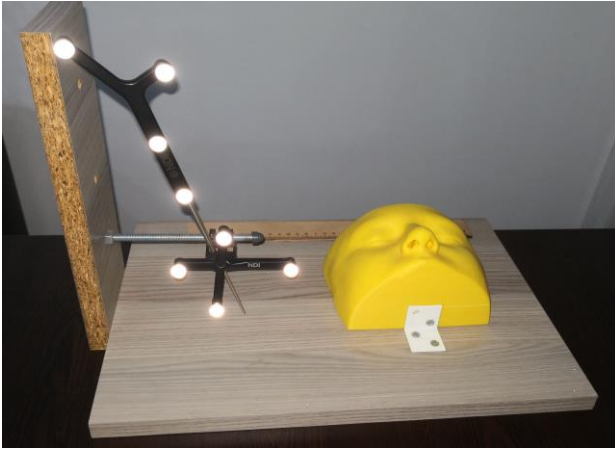
Photogrammetric Surgical Navigation Systems are getting more importance day by day to minimize the surgical operation times and the risk of classical methods with respect to the technological developments. More reliable surgical operations are now possible in shorter times without opening the whole related location of the body if it is not necessary. In surgical navigation; moving surgical probes which are periodically tracked and navigated to a desired location on a layer that is defined in a standart measuring unit are used. It is of vital importance to calibrate the cameras photogrammetrically for real-time 3D movements of the probes to be located highly accurate. In this study; the effect of respective calibrations for measuring accuracy of the system is investigated. For this purpose; camera interior orientation parameters and stereo camera baseline length are re-calculated with the advanced adjustment techniques. In this study; "Stereo Photogrammetric Surgical Navigation Software" and "Photogrammetric Camera Calibration Software" which have been developed since 2014 by responsible author are used. As a result of study; it is observed and presented in detail that the calibrated system components have brought the real-time location measurement accuracy from 2-3 mm level to 0,2 mm level.

Keywords

Surgical navigation;
Close-range
photogrammetry;
Camera calibration;
Least-squares
adjustment;
Geolocation accuracy

1. Giriş

Teknolojik yeniliklere paralel olarak; fotogrametrik yöntemlerle 3 Boyutlu (3B) olarak gerçekleştirilen cerrahi uygulamalar son yıllarda giderek daha da öne çıkan bir alan haline gelmektedir. Cerrahi navigasyon sistemleri sayesinde geleneksel yöntemlerin ihtiva ettiği riskler ve cerrahi işlem süreleri en aza indirilmektedir. Özellikle cerrahi operasyonun yapılacağı alanın bütünüyle açılmasına gerek duyulmayan işlemlerde hasta üzerinde belirlenen en uygun bölgede sadece sondanın gönderileceği kadar yeterli bir dokunun açılması suretiyle daha kısa sürede ve daha güvenli cerrahi müdahaleler yapılabilmektedir. Bu çalışmada ele alınan optik esaslara dayalı fotogrametrik cerrahi navigasyonda; standart 3B altlık uzaylar üzerinde (MR, Tomografi, vb.) fotogrametrik teknikler ve ileri dengeleme yöntemleri yardımıyla, gerçek zamanlı ve anlık olarak takip edilen (3B konumları belirlenen) ve cerrahi müdahalenin yapılacağı ilgili bölgeye yönlendirilen hareketli sondalar kullanılmaktadır.

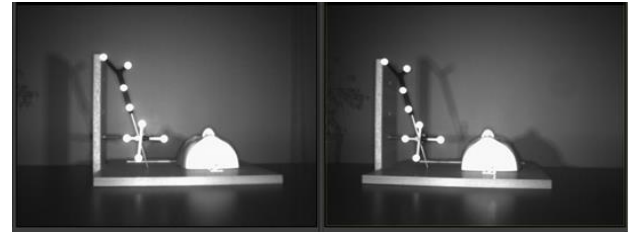


Şekil 1. Referans yüzey, hareketli sonda ve sabitlenen kafa modeli.

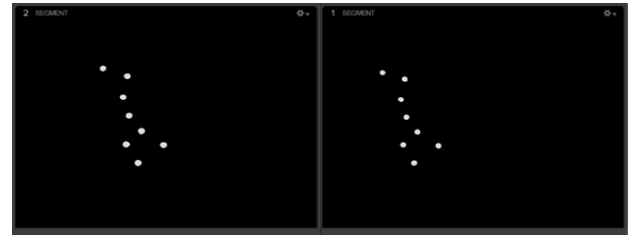
Bu çalışmada; bilimsel teknik olarak 3B stereo görüş, stereo fotogrametri ve En Küçük Kareler (EKK) dengelemesi, konumlandırılan ve takip edilen hareketli objeler olarak ise cerrahın kullandığı hareketli sondalar esas alınmıştır. 3B Konumlamanın yapılabilmesi için sondalar üzerinde uygun geometrik dağılıma sahip gümüş toplar bulunmaktadır ve bu gümüş topların anlık ve otomatik tespitinin daha kolay yapılabilmesi için 800 nm yakın kızılötesi (Near InfraRed-NIR) bantta görüntü alımı yapan kameralar kullanılmıştır.

Bu kameralar ameliyat ortamını belirli bir baz aralığında eş zamanlı ve stereo olarak görüntülemektedir. Kullanılan aletler Şekil 1'de, görüntüleme örneği ise Şekil 2'de sunulmuştur.

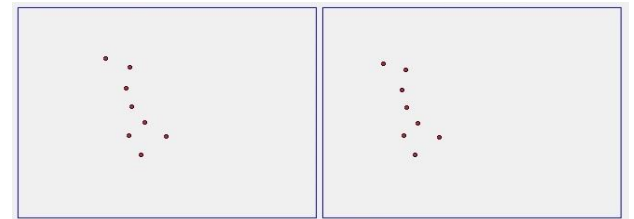
Stereo görüntüleme prensibine dayalı olarak; her iki kamera görüntüsü içerisine giren hareketli sonda üzerindeki gümüş topların anlık görüntü koordinatları kullanılarak bu topların ameliyat ortamında tanımlanan bir obje uzay koordinat sistemindeki anlık 3B koordinatlarının hesaplanması için uzayın merkezi izdüşümü esaslarına dayalı uzayda 3B benzerlik dönüşümü yapılmaktadır. Söz konusu benzerlik dönüşümünün yapılabilmesi için öncelikle her iki kameranın obje uzay koordinat sistemindeki öteleme ve dönüklük parametrelerinin (dış yöneltme parametrelerinin) gerçek zamanlı ve anlık olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu dengelemenin yapılabilmesi için obje uzay koordinat sistemindeki 3B koordinatları (X, Y, Z) yüksek doğruluklarla bilinen en az dört adet sabit referans noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için ise üzerinde yeterli sayıda gümüş top bulunan referans yüzeyler kullanılmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. Gri tonlamalı normal görüntüler (a), Filtrelenmiş NIR görüntüler (b) ve otomatik olarak tespit edilmiş vektör görüntü koordinatları (c).

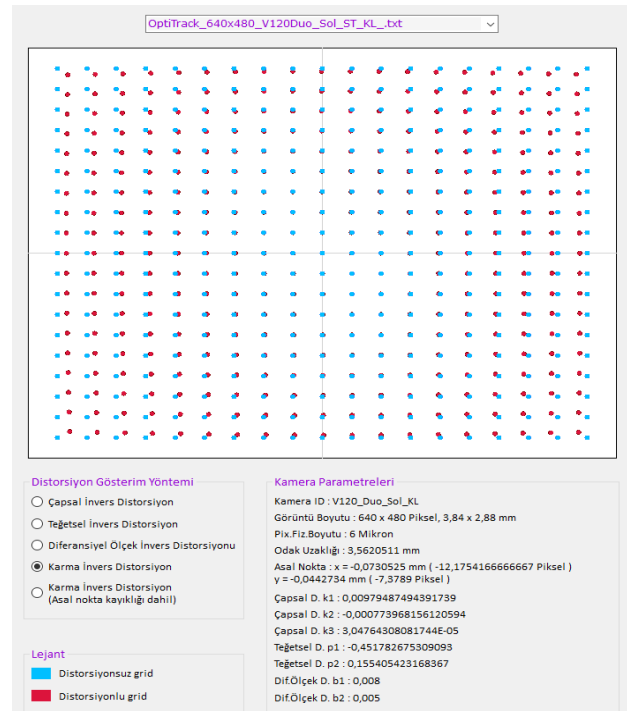
Objeye uzay koordinat sistemi bu referans düzlem üzerinde tanımlanmaktadır ve operasyona başlamadan önce hasta ile birlikte birbirlerine sabitlenmektedir. Hasta ile referans yüzey birlikte sabitlendiği için cerrahi müdahale boyunca hasta, tanımlanan objeye uzay koordinat sistemi içerisinde hep aynı konumda bulunmaktadır. Burada önemli olan nokta; dış yöneltme parametreleri sürekli ve gerçek zamanlı olarak çözüldüğünden, ihtiyaç halinde kamera platformu stereo görüşün uygun olacağı farklı bir konuma çekilebilmektedir. Referans yüzey ile hastanın konumu birbirlerine göre sabit olduğundan bu durum hastanın objeye uzay koordinat sistemindeki konumunu değiştirmemektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere söz konusu dış yöneltme parametrelerinin EKK dengelemesi ile hesaplanması görüntüleme frekansına bağlı olarak saniyede çekilen her eş zamanlı (senkronize) stereo görüntü çifti için yapılmaktadır.

Cerrahın elindeki hareketli sondanın 3B konumunu anlık takip edebilmek için ise; sonda üzerinde bulunan en az dört adet gümüş topa ait görüntü koordinatları anlık görüntü işleme yardımıyla tespit edilmekte ve bilinen dış yöneltme parametreleri ile eş-doğrusallık (kolinearite) bağıntıları birlikte kullanılarak anlık 3B objeye uzay koordinatları hesaplanmaktadır. Hareketli sonda üzerindeki gümüş toplar ile sonda ucuna ait sonda lokal koordinatları ve birbirleri arasındaki çapraz mesafelerin yüksek doğrulukla bilinmesinden yola çıkarak yine EKK dolaylı model dengelemesi ile 3B benzerlik dönüşümü yapılarak sonda uç noktasının gerçek zamanlı objeye uzay koordinatları hesaplanmaktadır. Bu dengeleme esansında sonda üzerindeki gümüş topların aynı düzlemde olması ve çapraz mesafeleri kısıt olarak kullanılmakta ve konum doğruluğu iyileştirilmektedir.

Yukarıda anlatılan bütün işlem ve hesaplamaların yapıldığı Cerrahi Navigasyon Sistemi ve Kamera Kalibrasyon Sistemi yazılımları sorumlu yazar tarafından C# dilinde geliştirilmiştir. Söz konusu yazılımlar kullanılarak ameliyat veya operasyon uzayında kullanılan sondaların 3B konumlarının gerçek zamanlı tespiti $\pm 0,2$ mm doğrulukla elde edilebilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Yukarıda anlatılan işlem adımlarının ve sonuç koordinatlarının istenilen yüksek doğrulukta elde edilebilmesi için fotogrametrik kamera kalibrasyonu ve stereo kamera baz kalibrasyonunun yapılması şarttır. Kullanılan kameraların kalibrasyonu sonucunda optimize edilen parametrelerine göre distorsiyon ve kamera detay gösterimi için yazılıma eklenen kamera detay görüntüleme modülüne ait arayüz Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Kalibrasyon sonuçlarına göre kamera detay ve distorsiyon gösterimi

2.1 Kamera (Sensör) kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu; her iki kameraya ait Çizelge 1'de verilen iç yöneltme parametrelerinin yüksek doğrulukla hesaplanmasını esas almaktadır.

Çizelge 1. İç yöneltme parametreleri listesi.

Sembol	Açıklama
c	Odak uzaklığı
x_0, y_0	Asal noktanın ve aynı zamanda distorsiyon merkezinin konumu
k_1, k_2, k_3	Çapsal distorsiyon katsayıları
p_1, p_2	Teğetsel distorsiyon katsayıları
b_1, b_2	Sayısal kamera diferansiyel ölçek distorsiyonu katsayıları

Söz konusu kamera kalibrasyonu EKK dengelemesi yöntemiyle yapılmaktadır. Bu dengeleme için önceden hassas olarak tasarlanmış bir kalibrasyon levhası üzerindeki kesişim noktaları Yer Kontrol Noktası (YKN) mantığıyla kullanılmaktadır. Koordinatları bilinen bu kesişim noktalarına ait elde edilen görüntü koordinatları (x, y) EKK dengelemesine ölçümler olarak, Çizelge 1’de verilen iç yöneltme parametreleri ise bilinmeyen olarak sokulmaktadır.

Çizelge 2. EKK dengeleme karakteristiği.

Sembol	Açıklama
n	Kesişim noktalarına ait her görüntüde 2 adet olmak üzere x ve y görüntü koordinatları ve ilave olarak levha konumları arası ofset mesafesinden oluşan gözlem (ölçüm) sayısı
u	Çizelge 1’de verilen 10 adet bilinmeyen iç yöneltme parametresi ve her görüntü için 6 adet dış yöneltme parametresi
s	Dengelemenin serbestlik derecesi $(n - u)$

$n > u$ olmak şartıyla Çizelge 2’de karakteristiği verilen EKK dengelemesi ile u adet bilinmeyen, n adet ölçüm ile s serbestlik derecesinde çözülmektedir. Eş-doğrusallık (kolinearite) denklemlerinin görüntü koordinatları cinsinden yazılan (4) ve (5) numaralı eşitlikleri matematiksel modelimizin esasını teşkil etmektedir. Bu durumda;

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \quad (1)$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \quad (2)$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \quad (3)$$

Olmak üzere, distorsiyonsuz ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını ifade eden \tilde{x} ve \tilde{y} eşitliklerimiz aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\tilde{x} = -c \frac{Z_x}{N} \quad (4)$$

$$\tilde{y} = -c \frac{Z_y}{N} \quad (5)$$

Ölçülen ham görüntü koordinatları x ve y , asal noktanın görüntü koordinat sistemindeki konumu x_0 ve y_0 ve yalnızca asal nokta kayıklığı ötelenmiş görüntü koordinatları \tilde{x} ve \tilde{y} olmak üzere distorsiyon eşitliklerimizi yazacak olursak;

- (6) ve (7) numaralı eşitlikler çapsal distorsiyon,
- (8) ve (9) numaralı eşitlikler teğetsel distorsiyon,
- (10) numaralı eşitlik ise sayısal kamera diferansiyel ölçek distorsiyon etkisini ifade etmektedir.

$\tilde{x} = x - x_0$, $\tilde{y} = y - y_0$ ve $r = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$ olmak üzere;

$$\delta x_1 = \tilde{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (6)$$

$$\delta y_1 = \tilde{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (7)$$

$$\delta x_2 = p_1(r^2 + 2\tilde{x}^2) + 2p_2\tilde{x}\tilde{y} \quad (8)$$

$$\delta y_2 = p_2(r^2 + 2\tilde{y}^2) + 2p_1\tilde{x}\tilde{y} \quad (9)$$

$$\delta x_3 = b_1\tilde{x} + b_2\tilde{y} \quad (10)$$

Bu durumda distorsiyon etkisi ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını (11) ve (12) numaralı eşitliklerdeki gibi distorsiyon ve asal nokta kayıklığı düzeltmelerini içerecek şekilde açabiliriz.

$$\tilde{x} = \tilde{x} + \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 \quad (11)$$

$$\tilde{y} = \tilde{y} + \delta y_1 + \delta y_2 \quad (12)$$

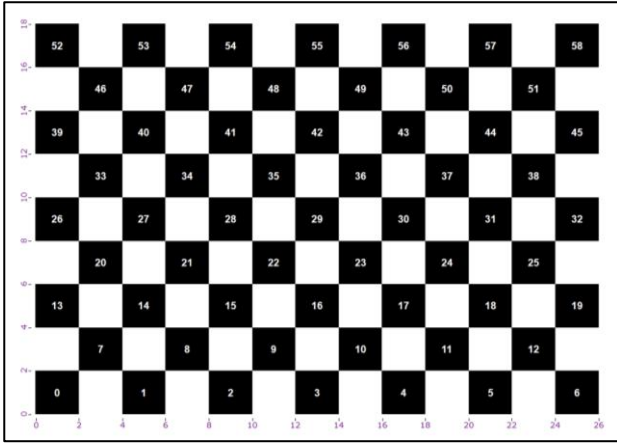
Son olarak; bütün parametreleri ve bilinmeyenleri içerecek şekilde eş-doğrusallık denklemlerimizi ölçülen (ham) görüntü koordinatları cinsinden (13) ve (14) numaralı eşitliklerdeki gibi yeniden yazabiliriz.

$$x = x_0 - c \frac{Z_x}{N} - \delta x_1 - \delta x_2 - \delta x_3 \quad (13)$$

$$y = y_0 - c \frac{Z_y}{N} - \delta y_1 - \delta y_2 \quad (14)$$

Yukarıda detaylı olarak anlatılan matematiksel model kullanılarak Şekil 4’de gösterilen kalibrasyon levhasının farklı mesafelerden çekilen görüntülerinden okunan ve (13) ile (14) numaralı eşitliklerle ifade edilen ham görüntü koordinat ölçümlerine (gözlemlerine) ilave olarak (15) numaralı eşitlikle verilen levha konumları arası ofset mesafesinden oluşan şart (koşul) gözlemi EKK yöntemiyle iteratif dolaylı model dengelemesine sokularak kamera iç yöneltme parametreleri hesaplanmaktadır.

$$Ofs = \sqrt{(X_{01} - X_{02})^2 + (Y_{01} - Y_{02})^2 + (Z_{01} - Z_{02})^2} \quad (15)$$



Şekil 4. Kalibrasyon levhası.

Kamera kalibrasyonunda her bir kamera ayrı olarak değerlendirilmekte ve dolayısıyla mono görüntüler kullanılmaktadır. Gözlem (ölçüm) denklemlerinin bilinmeyenlere göre türevleri alınarak Taylor serilerine açılmak suretiyle katsayılar (dizayn) matrisi her iterasyon için dinamik olarak oluşturulmakta ve dengeleme için belirlenen yakınsama ve doğruluk kriterleri sağlanana kadar iteratif olarak çözülmektedir. Farklı parametrelerin ölçüm doğruluğuna olan etkisini ayrı ayrı incelemek maksadıyla iç yöneltme parametrelerinin kısmi veya tamamının dengelemeleri yapılabilecek şekilde yazılımda ilave kodlama yapılmıştır.

2.2. Stereo kamera baz kalibrasyonu

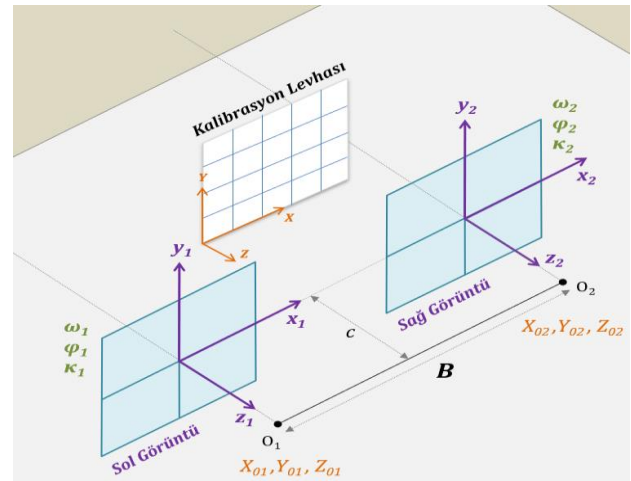
Her ne kadar anlık olarak hesaplanan sağ ve sol kamera dış yöneltme parametrelerinden stereo kamera bazı hesaplanabilse de referans yüzeyin her iki görüntü düzlemi üzerinde küçük bir bölgeye izdüşümünden kaynaklı konumlama (referanslama) hatasını minimize etmek maksadıyla stereo kamera bazının kalibrasyon dengelemesi ile önceden belirlenerek anlık ölçümlere şart gözlemi olarak dâhil edilmesi konumlama hassasiyetine olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

Bu dengeleme; kalibrasyon levhasının her iki kamera görüntüsü üzerine maksimum yayılacak şekilde stereo görüntüleri alındıktan sonra levha üzerinde bulunan kesişim noktalarına ait x ve y görüntü koordinatları ve bu kesişim noktalarının bilinen obje uzay koordinatları yardımıyla, her görüntü için 6 adet olmak üzere, stereo çift için toplam 12 adet dış yöneltme parametresinin EKK dengelemesi yardımıyla iteratif olarak optimize edilmesi esasına

dayanmaktadır. Dengeleme öncesinde her iki kameranın da fotogrametrik kalibrasyonlarının yapılarak iç yöneltme parametrelerinin yüksek doğruluklarla belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle; dengelemeye sokulan her bir x ve y gözlemi (görüntü koordinatı) için gerekli distorsiyon ve asal nokta kayıklığı düzeltmeleri (11) ve (12) numaralı eşitliklerdeki gibi en baştan uygulanmakta ve kalibre edilmiş odak uzaklığı da dikkate alındığında uzayın merkezi izdüşümü olması gerekene en yakın haliyle ifade edilerek işlemlere başlanmaktadır. Dengelemeye sokulan her bir x ve y gözlemi için (4) ve (5) numaralı eş-doğrusallık (kolinearite) eşitlikleri matematiksel model olarak alınmıştır.

Baz kalibrasyonunda önemli olan nokta; ilave olarak belirlenmek istenen stereo kamera bazının aslında bir bilinmeyen değil bilinmeyenler yardımıyla optimize edilen ilave bir değer olmasıdır. Sonuç olarak; Şekil 5’de görüldüğü üzere sol kameraya ait (X_{01}, Y_{01}, Z_{01}) ve sağ kameraya ait (X_{02}, Y_{02}, Z_{02}) olmak üzere, dengeleme neticesinde elde edilen her iki kameraya ait dış yöneltme parametreleri kullanılarak (16) numaralı eşitlik yardımıyla sabit olan stereo kamera bazı (B) kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

$$B = \sqrt{(X_{01} - X_{02})^2 + (Y_{01} - Y_{02})^2 + (Z_{01} - Z_{02})^2} \quad (16)$$

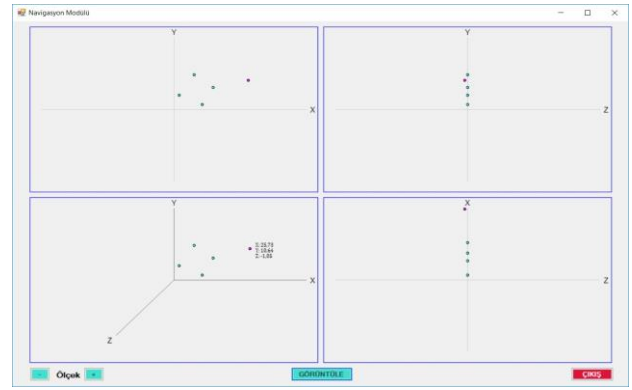


Şekil 5. Stereo kamera bazının kalibrasyonu.

Kalibre edilen söz konusu stereo kamera bazı, ilgili stereo kamera tanıtım dosyasında gereken yere yazılarak gerçek zamanlı ölçümler esnasında iyileştirme gözlemi olarak döngüye dâhil edilmektedir.

2.3. Cerrahi navigasyon ve kamera kalibrasyon yazılımları

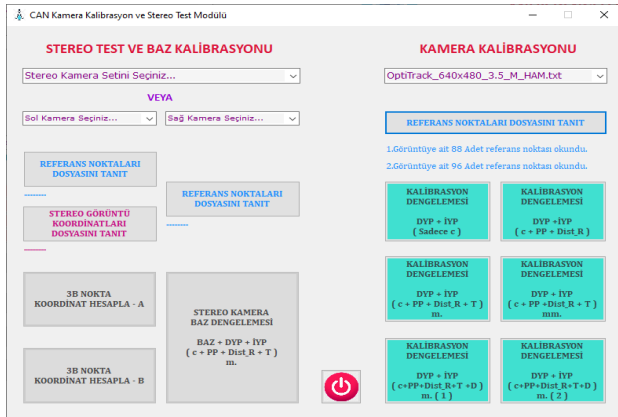
CAN Stereo Fotogrametik Cerrahin Navigasyon yazılımı sorumlu yazar tarafından 2014-2021 yılları arasında doktora çalışması kapsamında geliştirilmiştir. Temel olarak; Hareketli obje tespit ve ölçüm, Navigasyon, Kalibrasyon ve Kamera detay görüntüleme modüllerini içermektedir. Modüllere ait kullanıcı arayüzleri Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da sunulmuştur.



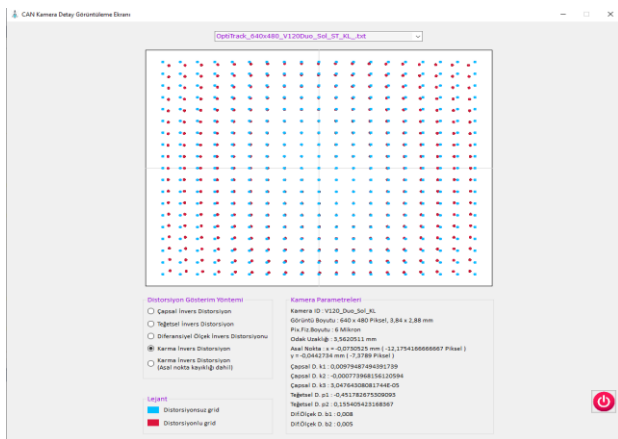
Şekil 9. Navigasyon modülü.



Şekil 6. Hareketli obje tespit ve ölçüm modülü.



Şekil 7. Kamera kalibrasyon ve stereo test modülü.



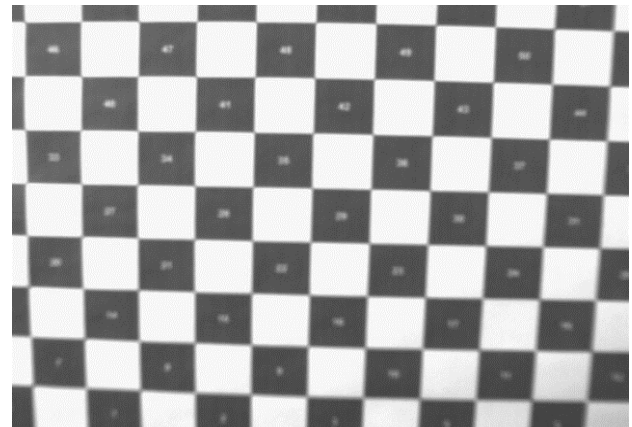
Şekil 8. Kalibrasyon görüntüleme modülü.

3. Uygulama ve Bulgular

Bölümde 2’de ayrıntılı olarak değinilen bilgiler ışığında sağ ve sol olmak üzere her iki kamera ile kalibrasyon levhasının görüntüleri çekilerek kamera kalibrasyonu ve stereo kamera baz kalibrasyonu dengelemeleri yapılmış ve elde edilen yeni iç yöneltme parametreler kullanılarak hareketli sonda üzerinde gerçek zamanlı stereo ölçüm testleri icra edilmiştir. Söz konusu testler, kalibrasyon modülü içerisindeki stereo test özelliği kullanılarak yapılmaktadır. Testlerde kullanılan stereo kamera ve kalibrasyon levhasının dengeleme için çekilen gri tonlamalı örnek bir görüntüsü Şekil 10’da sunulmuştur.



(a)



(b)

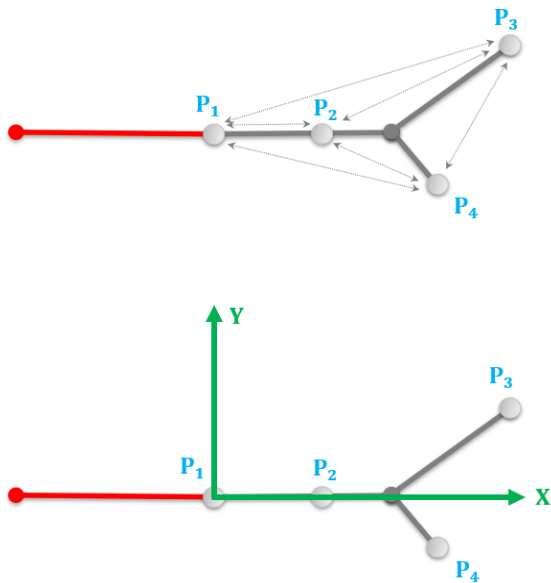
Şekil 10. Kullanılan Optitrack v120 Duo stereo kamera (a) ve örnek bir görüntüsü (b).

Söz konusu testler, hareketli sonda üzerinde bulunan gümüş toplar arasında yüksek doğruluklarla önceden bilinen çapraz mesafeler üzerinden yapılmıştır. Sondanın ölçümler esnasında obje uzayında her zaman hareketli ve dolayısıyla da keyfi bir konumda bulunması sebebiyle testlerde çapraz mesafeler kullanılmıştır. Kalibrasyonlar neticesinde yapılan stereo ölçüm testleri sonucunda hesaplanan mesafeler önceden bilinenler ile karşılaştırılarak Bölüm 3.1 ve 3.2’ de sunulmuştur.

Testlerde kullanılan hareketli sonda üzerinde bulunan gümüş topların önceden $\pm 0,05$ mm hassasiyetle bilinen yüksek doğruluklu lokal (üretim) koordinatları Çizelge 3’de, bu lokal koordinatlardan hesaplanan ve yapılan kontrollere esas teşkil eden çapraz mesafelere ait grafik gösterim ise Şekil 11’de sunulmuştur.

Çizelge 3. Sonda lokal (üretim) koordinatları.

NO	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	0,00	0,00	0,00
P2	50,00	0,00	0,00
P3	135,00	25,00	0,00
P4	100,00	-25,00	0,00



Şekil 11. Sonda üzerinde kontrol edilen çapraz mesafeler ve lokal koordinat eksenleri.

3.1. Kamera kalibrasyonunun ölçüm doğruluğuna etkisi

Kalibrasyon levhasının 2 farklı mesafeden çekilen mono görüntüleri kullanılarak her kamera için ayrı olarak yapılan dengeleme sonucunda her iki kamera için hesaplanan yeni iç yöneltme parametreleri Çizelge 4’de verilmiştir. Söz konusu parametrelerin dengeleme sonucunda hesaplanan hata miktarları Çizelge 4’de yuvarlandıkları anlamlılık düzeylerinin çok altındadır ve tablonun sadeliği açısından verilmemiştir. Elde edilen bu yeni parametreler kullanılarak Şekil 11’de görülen sonda üzerindeki gümüş topların gerçek zamanlı obje uzay koordinatları (X, Y, Z) ve birbirleri arasındaki çapraz mesafeleri fotogrametrik olarak hesaplanmış ve önceden bilinen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4. Kamera kalibrasyon sonuçları (640x480 piksel çözünürlük ve 6x6 μ m fiziksel piksel boyutu ile)

Parametre	Simge	Sol Kamera	Sağ Kamera
Odak uzaklığı (mm)	c	3,562	3,571
Asal noktanın konumu (mm)	x_0	-0,0621	0,0001
	y_0	-0,0438	-0,0825
Çapsal distorsiyon katsayıları	k_1	9,701 E-03	7,815 E-03
	k_2	-7,341 E-04	-5,439 E-05
	k_3	2,544 E-05	-5,002 E-05
Teğetsel distorsiyon katsayıları	p_1	-5,109 E-04	-1,290 E-04
	p_2	1,618 E-04	-7,585 E-06
Diferansiyel Ölçek dist. katsayıları	b_1	1,183 E-05	1,408 E-05
	b_2	1,027 E-06	9,421 E-06

Elde edilen sonuçlar ışığında; yalnızca odak uzaklığının kalibre edilmesinin anlamlı sonuçlar vermediği, asal noktanın konumu, çapsal ve diferansiyel ölçek distorsiyon katsayılarının kalibre edilmesinin sistemin ölçüm doğruluğuna önemli oranda katkı sağladığı, teğetsel distorsiyon etkisinin ise ihmal edilebilir seviyede olduğu Çizelge 5’de sunulan karşılaştırma tablosunda görülmektedir.

Çizelge 5. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi.

MESAFE NO	A (mm.)	B (mm.)					FARKLAR (mm.)				
		B1	B2	B3	B4	B5	A – B1	A – B2	A – B3	A – B4	A – B5
P1 - P2	50,00	49,04	49,35	49,94	49,94	49,96	0,96	0,65	0,06	0,06	0,04
P1 - P3	137,30	134,14	135,03	136,76	136,74	137,09	3,16	2,27	0,54	0,56	0,21
P1 - P4	103,08	101,61	102,17	102,60	102,50	102,93	1,47	0,91	0,48	0,58	0,15
P2 - P3	88,60	86,28	86,87	88,17	88,14	88,43	2,32	1,73	0,43	0,46	0,17
P2 - P4	55,90	55,34	55,61	55,46	55,36	55,68	0,56	0,29	0,44	0,54	0,22
P3 - P4	61,03	58,33	58,86	60,94	60,93	60,91	2,70	2,17	0,09	0,10	0,12

A - Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafeler

B - Akıcı stereo görüntülerden gerçek zamanlı (anlık) ve fotogrametrik olarak hesaplanan mesafeler

B1 - Kalibrasyonsuz kamera parametreleri kullanılarak

B2 - Sadece odak uzaklığı kalibre edilerek

B3 - Odak uzaklığı, asal noktanın konumu ve çapsal distorsiyon katsayıları kalibre edilerek

B4 - Odak uzaklığı, asal noktanın konumu, çapsal ve teğetsel distorsiyon katsayıları kalibre edilerek

B5 - Odak uzaklığı asal noktanın konumu, çapsal, teğetsel ve diferansiyel ölçek distorsiyon katsayıları kalibre edilerek.

3.2. Stereo kamera baz kalibrasyonunun ölçüm doğruluğuna etkisi

Bölüm 2.2’de teorik olarak anlatıldığı üzere; kalibrasyon levhasının her iki kamera görüntüsü üzerine maksimum yayılacak şekilde çekilen stereo görüntüleri kullanılarak yapılan dengeleme sonucunda yüksek doğrulukla elde edilen sabit stereo kamera bazı Çizelge 6’da sunulmuştur.

Çizelge 6. Stereo kamera baz kalibrasyonu sonucu.

Parametre	Değer (mm)
Baz aralığı	200,72 ± 0,02

Yapılan araştırmalar ve matematiksel hesaplamalar ışığında; kameraların birbirlerine göre rölatif olarak sabit dönüklükte (içe dönük) ve sabit baz aralıklı olarak stereo kamera seti şeklinde kullanılmasının sistemin ölçüm doğruluğuna ve tutarlılığına olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür.

Bu teknik; önceden kalibre edilen (hassas olarak hesaplanan) stereo kamera bazının ilave şart gözlemi olarak sürekli ölçüm döngüsüne (dengelemelerine) dâhil edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede; referans yüzeyin görüntülerde küçük bir alana izdüşümü sebebiyle oluşabilecek referanslama ve ölçek hatası minimize

edilmekte, dolayısıyla gerçek zamanlı olarak elde edilen dış yöneltme parametreleri çok daha yüksek doğrulukla elde edilmekte ve buna bağlı olarak da nihai konumlama ve ölçüm doğruluğu bu oranda artmaktadır. Kalibre edilen stereo kamera bazının anlık ölçüm dengelemelerine ilave şart gözlemi olarak dâhil edilmesinin ölçüm doğruluklarına etkisi Çizelge 7’de sunulmuştur.

Çizelge 7. Stereo kamera bazının sabit şart gözlemi olarak dengelemeye dâhil edilmesinin anlık ölçüm doğruluklarına etkisi.

MESAFE NO	A (mm.)	B (mm.)		FARKLAR (mm.)	
		B1	B2	A – B1	A – B2
P1 - P2	50,00	50,95	49,96	0,95	0,04
P1 - P3	137,30	139,58	137,09	2,28	0,21
P1 - P4	103,08	104,55	102,93	1,47	0,15
P2 - P3	88,60	90,01	88,43	1,41	0,17
P2 - P4	55,90	56,36	55,68	0,46	0,22
P3 - P4	61,03	61,91	60,91	0,88	0,12

A - Fiziksel olarak yüksek doğrulukla hassas olarak ölçülen mesafe

B - Akıcı stereo görüntülerden gerçek zamanlı (anlık) olarak hesaplanan mesafe

B1 - Stereo kamera bazı şart gözlemi olarak alınmadan

B2 - Kalibre edilmiş stereo kamera bazı ilave şart gözlemi olarak alınarak.

4. Sonuç ve Öneriler

Stereo fotogrametri temel olarak uzayın merkezi izdüşümü ve uzayda 3B benzerlik dönüşümünü esas almaktadır. Bu sebeple, söz konusu geometri ne kadar sağlıklı oluşturulursa o oranda doğru ve güvenilir konum doğruluğu elde edilmektedir. Bu geometriyi sağlıklı olarak ortaya koymanın yolu ise kamera iç yönelme bilinmeyenlerinin yüksek doğruluklarla belirlenmesinden geçmektedir.

Bu çalışmada; ölçüm doğruluklarının hayati öneme sahip olduğu cerrahi navigasyon uygulamalarında kullanılan sistem ve kameraların ileri dengeleme teknikleriyle fotogrametrik kalibrasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Fotogrametrik kamera kalibrasyonu ile uzayın merkezi izdüşüm geometrisi sağlıklı olarak ortaya konya da anlık ölçüm doğruluklarını etkileyen diğer bir faktör ise kameraların gerçek zamanlı referanslama işlemidir. Bu işlem YKN kullanımına benzer şekilde dizayn edilen referans yüzey ile yapılmaktadır fakat, referans yüzeyin her iki görüntüde de mecburen ufak bir alana izdüşümü sebebiyle anlık görüntülerin öteleme ve dönüklükleri olumsuz yönde etkilenmekte, bu olumsuz etki ise nihai ölçüm doğruluklarına yansımaktadır. Milimetre altında ölçüm doğruluğu gerektiren bu sistemlerde söz konusu olumsuz etkiyi minimize etmek için elde olan bütün ilave koşulların anlık çözümlere ve dengelemelere dâhil edilmesi gerekmektedir.

Hava fotogrametrisinden farklı olarak, anlık hareket tespiti ve anlık konum ölçümlerinin yapıldığı bu tarz sistemlerde iki kamera aynı anda senkronize bir şekilde, operasyon ortamını sağlıklı bir şekilde görüntülemek üzere sabit bir baz aralığında stereo kamera seti olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ayrıca; kamera iç yönelme parametrelerine ilave olarak, sabit olan stereo kamera bazı da ileri dengeleme teknikleriyle kalibre edilmiş ve gerçek zamanlı konum ölçümlerine ilave koşul (şart) olarak dâhil edilmiştir. Söz konusu ilave koşulun ölçüm sağlığında önemli derecede artış sağladığı ve $\pm 0,2$ mm duyarlılıkta mutlak konum doğruluğu elde edildiği belirlenmiştir.

Yapılan stereo fotogrametrik ölçümlerin doğruluk ve duyarlılığı için; kamera odak uzaklığı, kamera görüş açısı, görüntü çözünürlüğü, stereo baz mesafesi, görüntüleme mesafesi, referans yüzey ve sondaların boyut ve geometrileri gibi bileşenlerin sistem tasarımı esnasında en baştan sağlıklı bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarları; 7 yıllık doktora ve yazılım çalışmaları süresince değerli katkılarından dolayı Doç.Dr. H. Hakan MARAŞ, Dr.Müh. Coşkun DEMİR ve Prof.Dr. Bahadır AKTUĞ'a teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

- Alturki, A.S., 2017. Principal point determination for camera calibration, PhD Thesis, University of Dayton, Dayton (USA), 104.
- Brown, D.C., 1966. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, **32**(3), 444-462.
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **37**(8), 855-866.
- Bukhari, F., Dailey, M.N., 2013. Automatic radial distortion estimation from a single image, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, **45**(1), 31-45.
- Clarke, T.A. & Fryer, J.F. 1998. The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, **16**(91), 51-66.
- Cronk, S., Fraser, C.S. and Hanley, H.B., 2006. Automatic Calibration of Colour Digital Cameras. *Photogrammetric Record*, **21**(116), 355-372.
- Fraser, C.S., 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **52**, 149-159.
- Fraser, C.S. and Al-Ajlouni, S., 2006. Zoom-dependent camera calibration in close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**(9), 1017-1026.
- Fraser, C.S., 2013. Automatic camera calibration in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **79**(4), 381-388. Doi:0099-1112/13/7904-381.

- Fryer, J.G. and Brown, D.C., 1986. Lens distortion in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **52**(2), 51-58.
- Fryer, J.G and Fraser, C.S., 1986. On the calibration of underwater cameras. *Photogrammetric Record*. **12**(67), 73-85.
- Fryer, J.G., 1989. Camera calibration in non-topographic photogrammetry. *ASPRS*, 59-69.
- Fryer, J.G. and Goodin, D.J., 1989. In-flight aerial camera calibration from photography of linear features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(12), 1751-1754.
- Fryer, J.G., 1992. Recent developments in camera calibration for close-range applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **29**(5), 594-599.
- Fryer, J.G., 1996. Camera calibration. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, Scotland, 156-179.
- Hallert, B., 1963. The method of least squares applied to multicollimator camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **29**(5), 836-840.
- Hothmer, J., 1958. Possibilities and limitations for elimination of distortion in aerial photographs. *Photogrammetric Record*, **2**(12), 426-445.
- Kraus, K., 2008. Fotogrametri. Cilt-1. O.Altan, S.Külür, G.Toz, H.Demirel, Z.Duran, M.Çelikoyan (çeviri editorleri), Nobel Yayınları, 3-462.
- Linder, W., 2009. Digital Photogrammetry - A Practical Course. Springer-Verlag, Heidelberg, 1-179.
- Luhmann, T., Hastedt, H. and Tecklenburg, W., 2006. Modelling of chromatic aberration for high precision photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36**(5), 173-178.
- Nakiboğlu, M., Demir, C., 2006. Dengeleme Hesabı (Dengeleme-1). Harita Genel Komutanlığı, 1-62.
- Nakiboğlu, M., Demir, C., 2006. Dengelemede İleri Uygulamalar (Dengeleme-2). Harita Genel Komutanlığı, 1-64.
- Sampath, A., Moe, D. and Christopherson, J., 2012. Two methods for self-calibration of digital camera. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**(B1), 261-266
- Stamatopoulos, C., 2011. Orientation and calibration of long focal length cameras in digital close-range photogrammetry. PhD Thesis, Dept. of Infrastructure Engineering, University of Melbourne, Melbourne, 170.
- Wang, S., Tseng, Y.H., 2000. Automatic self-calibration of digital cameras for close-range photogrammetry. *IAPRS*, **33**, 7.

İnternet kaynakları

- 1- <https://www.isprs.org/>
- 2- <https://www.asprs.org/>
- 3- <https://www.researchgate.net/>
- 4- <https://social.msdn.microsoft.com/>
- 5- <https://www.c-sharpcorner.com/>
- 6- <https://stackoverflow.com/>

Yığma Yapılarda Kullanılan Kenetlerin Yapı Davranışına Etkilerinin İncelenmesi

Tülin ÇELİK¹, Şükran TANRIVERDİ^{1*}, Ali URAL¹, Fatih Kürşat FIRAT¹

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray

Sorumlu yazar e-posta: sukran_tugrulelci@hotmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-5788>
tulinsandikci@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-8638-9579>
uralali@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-8674-6169>
fkfirat@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0508-2845>

Geliş Tarihi: 04.02.2021

Kabul Tarihi: 26.06.2021

Öz

Anahtar kelimeler

Kenet;
Tarihi yapılar;
LUSAS;
Çekme gerilmesi;
Kayma dayanımı

Kültürel mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapılar, zaman içerisinde iklim şartları ve insan etkilerinden kaynaklanan yapısal bozulma, hasar ve yıkımlara maruz kalmıştır. Tarihi yapıların yapısal bütünlüklerini koruyarak gelecek nesillere güvenli bir şekilde aktarmak temel amaçlarımız arasında yer almalıdır. Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde aslına uygun malzeme ve uygun onarım ve güçlendirme teknikleri kullanılması gerekmektedir. Tarihi yapılarda en yaygın kullanılan onarım ve güçlendirme yöntemi kenet ve zıvanalardır. Yapılan çalışmada, kenetlerin batma noktasının taşın kenarına olan mesafesi dikkate alınmış ve kenetlerin taşın kayma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda deneysel çalışma laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup sayısal çalışmada 3 boyutlu modeli oluşturmak için sonlu elemanlar yöntemini (SEY) esas alan LUSAS yazılımı kullanılmıştır. Yapılan deney ve analiz sonuçlarına göre, taş kenarı ile batma noktası arasındaki mesafe incelenmiş ve bunların taşlar üzerindeki etkileri karşılaştırılarak incelenip, birtakım önerilerde bulunulmuştur.

Investigation of the Effects of Clamps Used in Masonry Structures on Building Behavior

Abstract

Keywords
Clamp;
Historical structures;
LUSAS;
Tensile stress;
Shear strength

Historical structures, which are an important part of our cultural heritage, have been exposed to structural deterioration, damage and destruction caused by climatic conditions and human effects over time. Preserving the structural integrity of historical structures and transferring them to hand down the next generations safely should be among our main aims. In order to repair and strengthen historical buildings, it is necessary to use original materials and appropriate repair and strengthening techniques. The most widely used method of repair and strengthening in historical buildings is clamps and dowels. In this study, the distance between the edge of the stone and immersion point of clamps was taken into account as variant parameter and the influence of the clamps on the shear strength of the stone are investigated experimentally and numerically. In this context, the experimental study was carried out in the laboratory and the LUSAS software based on the finite element method (FEM) was used to create a 3D model. According to the results of the experiments and analysis, the optimum distance between the edge of the stone and the immersion points are examined and some suggestions were made by comparing their effects on the stones.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Eski dönemlerde yapılan ve günümüze kadar gelebilen tarihi yapılar toplumların hayatını, kültürünü, inancını ve bulunduğu dönemin

özelliklerini bizlere anlatan eserlerdir. Anadolu coğrafyasında insanlar ihtiyaçlarını karşılamak için cami, tekke, imaret, medrese, han, hamam, köprü, su kemeri, saray ve kale gibi birçok farklı yapı inşa etmiştir. Bu tarihi yapılar gerek doğal felaketlerden

gerekse insan kaynaklı etkenlerden dolayı hasar görmüşlerdir. Birçok tarihi yapı, çevresel ve insan kaynaklı olumsuz etkenlere ve zamanın etkilerine karşı koyarak ayakta kalabilmeyi başarmıştır. Anadolu'da bulunan birçok tarihi yapı taş ve tuğla gibi malzemelerden inşa edilmiştir. Bu tür malzemeler kullanılarak yapılan tarihi yapıların basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımları ise düşüktür.

Tarihi yapılar düşük çekme dayanımlarına sahip olması sebebiyle yapıya gelen deprem gibi yatay kuvvetleri karşılayamadıkları için bu yapılar hasar görmekte ya da yıkılmaktadır. Bu tür yapılarda sünekliliği artıracak herhangi bir malzeme kullanılmaması nedeniyle dinamik etkiler altında gevrek bir davranış sergileyerek hasar görmektedir. Bu sebeplerden dolayı birçok donatısız tarihi yapı, onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç duymaktadır. Deprem gibi yatay kuvvetler karşısında yapı sisteminin bütünlük içinde hareket etmesi oldukça önemlidir. Tarihi yapıya gelen yatay kuvvetlere karşı, yapı sisteminin kayma kuvvetine karşı dayanımı oldukça düşük olması nedeniyle yapının bütünlüğü korunamamaktadır.

Tarihi yapıların yatay kuvvetlere karşı stabilitesini arttırmak amacıyla kenet ve zivana gibi metal bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Günümüzde literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde kenetlerin yığma yapı sistemi üzerine olumlu etkileri olduğu görülmüştür.

Baranaydın (2020), Ephesos St. Jean Kilisesi'nde 100 yıldır devam eden, geçmişte ve günümüzde yapılan restorasyon ve konservasyon tekniklerini, sonuçlarını, farklılıklarını ve benzerliklerini incelemiştir. Ephesos St. Jean Kilisesi'nde geniş boşluklu çatlakların onarımında demir kenet ile dikiş uygulamasının yapıldığı, kullanılan malzemelerin hatalı olması nedeniyle, uzun vadede yapısal sıkıntılara yol açtığına değinilmiştir. Yılmaz ve Tek (2018), Antalya Yivli minare ve camisinin mevcut durumunu inceleyerek cami ve minarede oluşan hasarları tespit etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların ve verilerin değerlendirmesi yapılarak yapılardaki hasarları gidermek amacıyla restorasyon ve güçlendirme önerileri geliştirmişlerdir. Minare gövdesindeki yapısal çatlakların onarılması ve beden duvarlarının güçlendirilmesi amacıyla metal

kenetler ile dikiş uygulaması yapılmasını önermişlerdir. Tanrıverdi (2018), çalışmada metal bağlantı elemanı olan kenetlerin, yığma taş blokların davranışlarına etkisini deneysel yöntemler kullanarak incelemiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda değişken olarak kenet demirlerinin yığma taş blok üzerindeki batma derinliği dikkate alınarak optimum batma derinliği bulunmuştur. Kurugöl ve Küçük (2015), çalışmada tarih boyunca kullanılan demir malzemesinin, geleneksel mimarideki uygulama alanı ve uygulanma biçimleri ele alınarak, üretim teknikleri ve şekil verme yöntemlerini incelemiştir. Çalışmada zaman içerisinde meydana gelen problemler ortaya konulmuştur. Ural vd. (2015) çalışmada, aynı boyuttaki yığma duvar numuneleri ile farklı kenet-zivana sistemlerinin uygulanması ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ile uygulanan sistemlerin, yığma duvarların kayma kapasitesine olan etkisi incelenmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Smoljanovic vd. (2015), kenet ve zivanalar ile güçlendirilmiş taş yığma yapıların analizi sonlu elemanlar metodunu kullanarak yapılan çalışmada çelik kenet ve çelik zivanalar ile güçlendirilen tarihi yığma yapının, sonlu elemanlar yöntemi ile sismik performansını tahmin etmişlerdir. Karabörk ve Koçak (2014), taş duvarlarının kesme mukavemetini artıran yeni metal bağlantı elemanları üzerinde kayma testleri yapmışlardır. Çeşitli bağlantı tasarımları ile üç farklı metal bağlantı elemanı, kayma dayanımı altında test edilmiştir. Yeni kenetlerin, duvar numuneleri üzerinde kesme mukavemetini ve sünekliliğini etkili bir şekilde arttırdığını öne sürmüşlerdir. Uslu, (2013), yaptığı çalışmada, metal bağlantı elemanları kullanılarak örülen yığma duvarlar üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Metal bağlantı elemanları olarak kenet ve zivana kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, yığma duvar numunelerini diyagonal basınç etkisine tabi tutarak duvarların kesme etkisindeki davranışlarını incelemiştir. Numuneler kırılma yüklerine ve kesme dayanımlarına göre değerlendirmeye alınmıştır. Kenet ve zivanalar ile yapılan yığma duvarların bağlantı elemanı kullanılmayan taş yığma duvara göre daha yüksek dayanım gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışma kapsamında genişliği ve batma derinliği aynı olan kenetlerin taşın kenarına olan mesafesinin yığma taşın kayma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Deney ve analiz sonuçları birbirleri ile karşılaştırılarak minimum kenet batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi belirlenmiştir.



Şekil 1. Artemis Tapınağı'nda bulunan yığma taş bloklar üstündeki kenet uygulamaları.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada Aksaray İli'nde bulunan Sevinçli Kasabasında çıkarılan volkanik kökenli tuf taşı kullanılmıştır. Yığma yapılarda kullanılan taşların basınç dayanımları yüksek, çekme dayanımları düşüktür. Deneyde kullanılan taşların da bu özellikleri yansıtması gerekmektedir. Taşın ve kenetin malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında malzeme deneyleri yapılmıştır. Volkanik kökenli tuf taşı için basınç dayanım testi, eğilmede çekme dayanım testi; kenet için ise çekme testi yapılmıştır. Taşın basınç dayanım

testi, TS EN 772-1+A1 (2015) (Kagir birimlerin basınç dayanımının tayini) dikkate alınarak yapılmıştır. Standartta belirtildiği gibi 50x50x50 mm³ ebatında toplamda 6 adet tuf taşı üzerinde basınç dayanım testleri yapılmıştır. Çizelge 1'de volkanik kökenli tuf taşının basınç dayanım test sonuçları verilmiştir. Deney sonucunda taşın ortalama basınç dayanım sonucu 4,13 MPa ve standart sapması 0,66 MPa elde edilmiştir.

Taşın eğilmede çekme dayanımını belirlemek amacıyla TS EN 772-6 (2004) (Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini) dikkate alınarak 40x40x160 mm³ ebatında toplamda 6 adet tuf taşı üzerinde testler yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanım test sonucunda taşın ortalama çekme dayanımı Çizelge 2'de verildiği gibi 0,71 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 1. Volkanik kökenli tuf taşının basınç dayanım test sonuçları.

Numune No	En kesit boyutları (mm)		Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
	a	b		
A1	52	51	12650	5,06
A2	50	50	10850	4,34
A3	50	50	8570	3,43
A4	50	48	9970	3,98
A5	52	50	11450	4,58
A6	51	53	8450	3,38
Ortalama				4,13
Standart Sapma				0,66

Çizelge 2. Volkanik kökenli tuf taşının eğilmede çekme dayanım test sonuçları.

Numune No	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
A1	490	0,77
A2	490	0,62
A3	560	0,88
A4	500	0,68
A5	450	0,59
A6	570	0,72
Ortalama		0,71

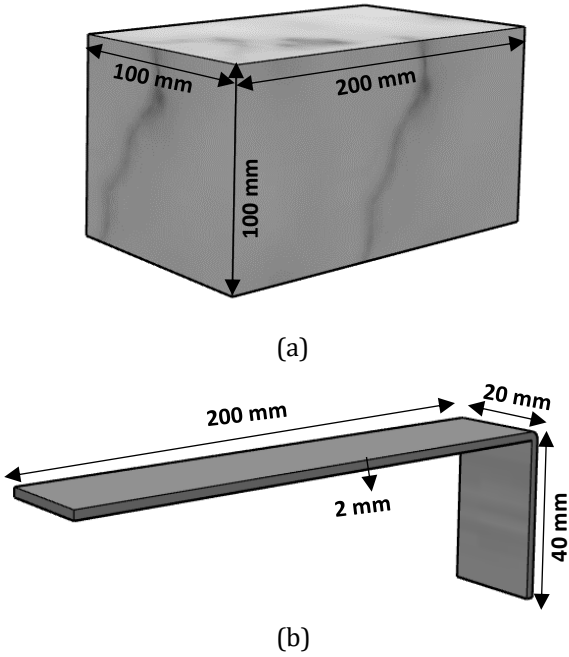
TS EN ISO 6892-1 (2020) (Metalik Malzemeler Çekme Deneyi) standardı dikkate alınarak, deneyde kullanılan kenetin çekme dayanımı testi yapılmıştır. Çekme dayanımları standartta belirtildiği gibi Denklem 1 ile hesaplanmıştır.

$$R_m = F_m \quad (1)$$

R_m : Çekme dayanımı, F_m ise deney sırasında akmanın gerçekleşmesi öncesinde numunenin dayandığı en büyük yükür. Kenet numunelerin çekme dayanımları deney sonucunda yaklaşık olarak 290 MPa bulunmuştur.

3. Deneysel Çalışma

Yapılan çalışmada kenetin batma noktasının tuf taşının kenarına olan mesafesi dikkate alınarak kenetin yığma taşın kayma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneyde ve analizde kullanılan tuf taşının ve kenet modelinin boyutları Şekil 2’de verilmiştir. Şekilde de belirtildiği gibi tuf taşının boyutları 100x100x200 mm³tür.

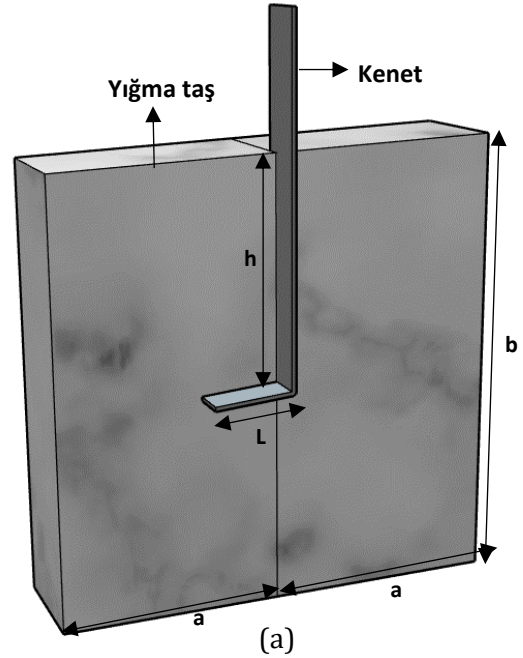


Şekil 2. a) Yığma taş boyutları, (b) Kenet modelinin boyutları.

Çalışmada kenetin genişliği 20 mm, batma derinliği 40 mm alınırken, değişken olarak ele alınan kenetin batma noktasının taşın kenarına olan uzaklığı Çizelge 3’de belirtildiği gibi 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ve 100 mm olarak ele alınmıştır. Kenet modelinin tuf taşı üzerine yerleştirilmiş şekli ve deney düzeneği Şekil 3’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3. Hazırlanan modellerin geometrik özellikleri.

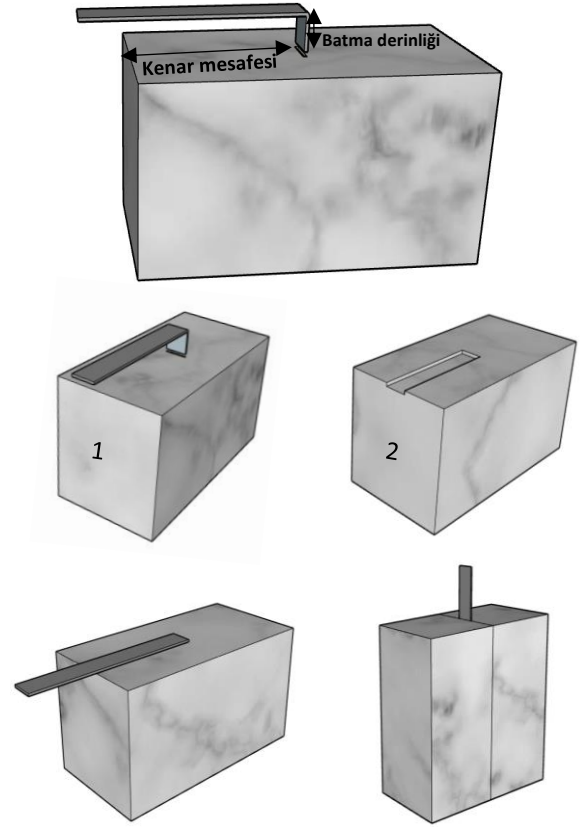
Model No	L (mm)	a (mm)	b (mm)	h (mm)
1				20
2				40
3	40	100	200	60
4				80
5				100



Şekil 3. (a) Kenet uygulamasının yerleştirilmesi, (b) Deney düzeneği.

Yapılan deneysel çalışma TS EN 1052-3 (2004) (Kâgir deney metotları) standartına uygun olarak hazırlanan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’de de belirtildiği gibi 300x400 mm²

boyutlarında 15 mm kalınlığındaki üç adet çelik plakalar, 50 mm uzaklıkta boşluklar açılarak köşelerinden çapı 16 mm olan tij demirleri ile birbirlerine bağlanmıştır. 10 tonluk yük hücresi eksenel yükü okuyabilmek amacıyla iki çelik plaka arasına yerleştirilmiştir. Standartta belirtildiği gibi yığma birimlerin basınç dayanımı 10 MPa'dan küçük olması durumunda eksenel basınç yükleri 0,1 MPa, 0,3 MPa ve 0,5 MPa olacak şekilde numunelere uygulanmalıdır. Eksenel basınç yükleri numuneye, tij demirlerine bağlı olan bulonların sıkılmasıyla çelik plakaların hareket etmesi sağlanarak verilmektedir. Deneyde kullanılan tuf taşının basınç dayanımı 4,13 MPa olması sebebiyle 0,5 MPa'lık eksenel basınç yükü verilmiştir. Numuneler üzerinde istenilen eksenel basınç yükü sağlandığı zaman, deney düzeneği üzerine hidrolik pompa ve 50 ton kapasiteye sahip yük hücresi ile kayma yükü verilmiştir. Deney düzeneğine yer değiştirmeleri ölçmek amacıyla LVDT (Linear Variable Differential Transformer) bağlanmıştır. Her bir numuneden en az üç tane yapılarak toplamda 15 adet numune deneye tabi tutulmuştur. Şekil 4'de gösterildiği gibi 100x100x200 mm³ boyutlarındaki tuf taşına, 20 mm genişliğinde, 40 mm batma derinliği olan kenetin batma derinliğinin kenara olan mesafeleri 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ve 100 mm olacak şekilde matkap yardımı ile boşluklar açılmıştır. 20 mm genişliğinde 2 mm kalınlığında kenetler bu boşluklara yerleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi diğer tuf taşı üzerine de 20 mm genişliğinde 2 mm kalınlığında ve kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ve 100 mm olacak şekilde oyuklar açılmıştır. Hazırlanan yığma taşlar deney düzeneğine yerleştirilerek, kayma yüklerini elde etmek amacıyla kenet elemanları hidrolik pompa yardımıyla yukarı doğru çekilmiştir. Deney sonucunda numunelerin maksimum kayma yükleri ve yapmış oldukları yer değiştirmeler tespit edilmiştir.



Şekil 4. Kenetin yığma taşların arasına yerleştirilmesi.

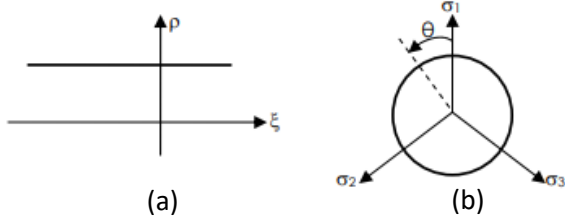
4. Kenet Modellerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Çalışmada kenet batma mesafesinin, taşın kayma dayanımına etkisi incelenmiştir. Deneysel olarak test edilen kenet modellerin LUSAS analiz programı kullanılarak sayısal analizi yapılmıştır. Çizelge 4'de belirtildiği gibi sayısal analizde taşın elastisite modülü 4000 MPa, Poisson oranı 0,2; kenetin elastisite modülü 203704 MPa, poisson oranı 0,3 olarak ele alınmıştır. Deneysel çalışmalara göre deney numunelerinin nonlinear (doğrusal olmayan) davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Makro modelleme ele alınarak elasto-plastik davranışını temsil eden Drucker-Prager kriteri uygulanmıştır. Drucker-Prager kriterinde önemli olan, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) parametreleridir (Tanrıverdi, 2020).

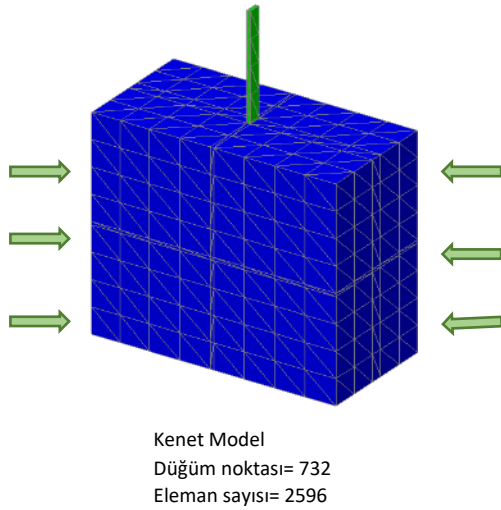
Sayısal analizde kenetlerde, genellikle metal elemanlar için uygulanan von Mises kriteri kullanılmıştır. Kriterin gerilme etkisi Denklem 2 ile ifade edilmektedir. von Mises kriterinin gerilme meridyenleri ve deviatorik düzlemdeki akma yüzeyleri Şekil 5'de verilmiştir.

$$f = \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

Burada k pozitif malzeme sabiti, J_2 ; deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantsını göstermektedir.



Şekil 5. von Mises kriterinin a) gerilme meridyeni, b) deviatorik düzlemdeki akma yüzeyleri (Dede, 2009).



Şekil 6. Kenetli modelin analizde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayısı.

Şekil 6'da kenetli modelin sonlu elemanlar analizinde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayısı verilmiştir. Kenet modelin düğüm noktası sayısı 732, eleman sayısı ise 2596'dır. Modelin x doğrultusunda ötelenmeleri sabitlenmiştir. Sayısal modelde her düğüm noktasında 3 adet serbestliği bulunan 10 düğüm noktalı 3 boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) sonlu elemanlar kullanılmıştır.

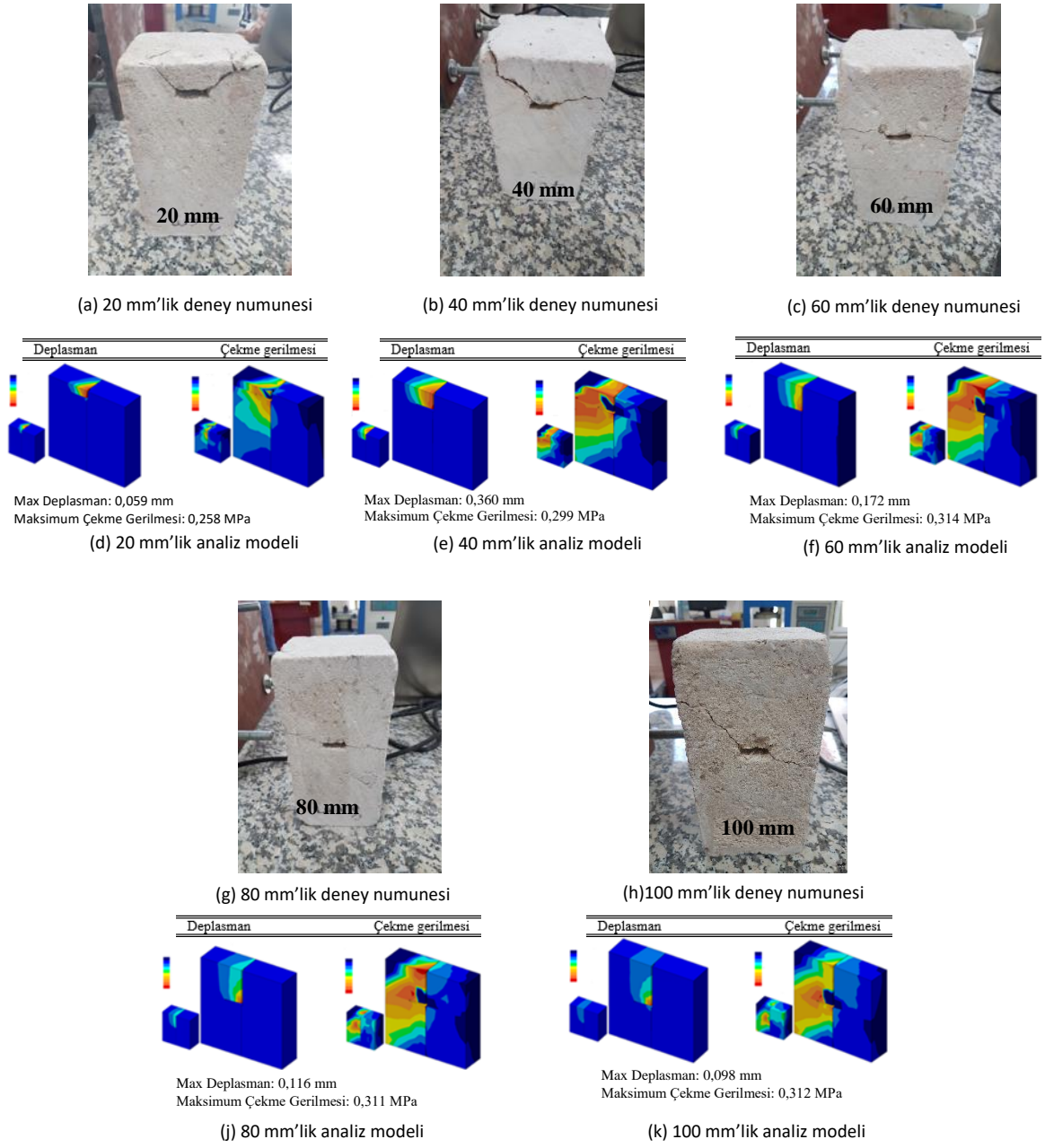
Analiz çalışmasında taşın θ (içsel sürtünme açısı) ve c (kohezyon) parametreleri için $\theta=25^\circ-35^\circ$ ve $c=2,80-3,70$ MPa değerleri dikkate alınmıştır (Doran,2003). Kenetin elastisite modülü 203704 MPa, poisson oranı 0,3 olarak ele alınmıştır (Çelik, 2020).

Çizelge 4. Analizde kullanılan malzemelerin özellikleri ve değerleri

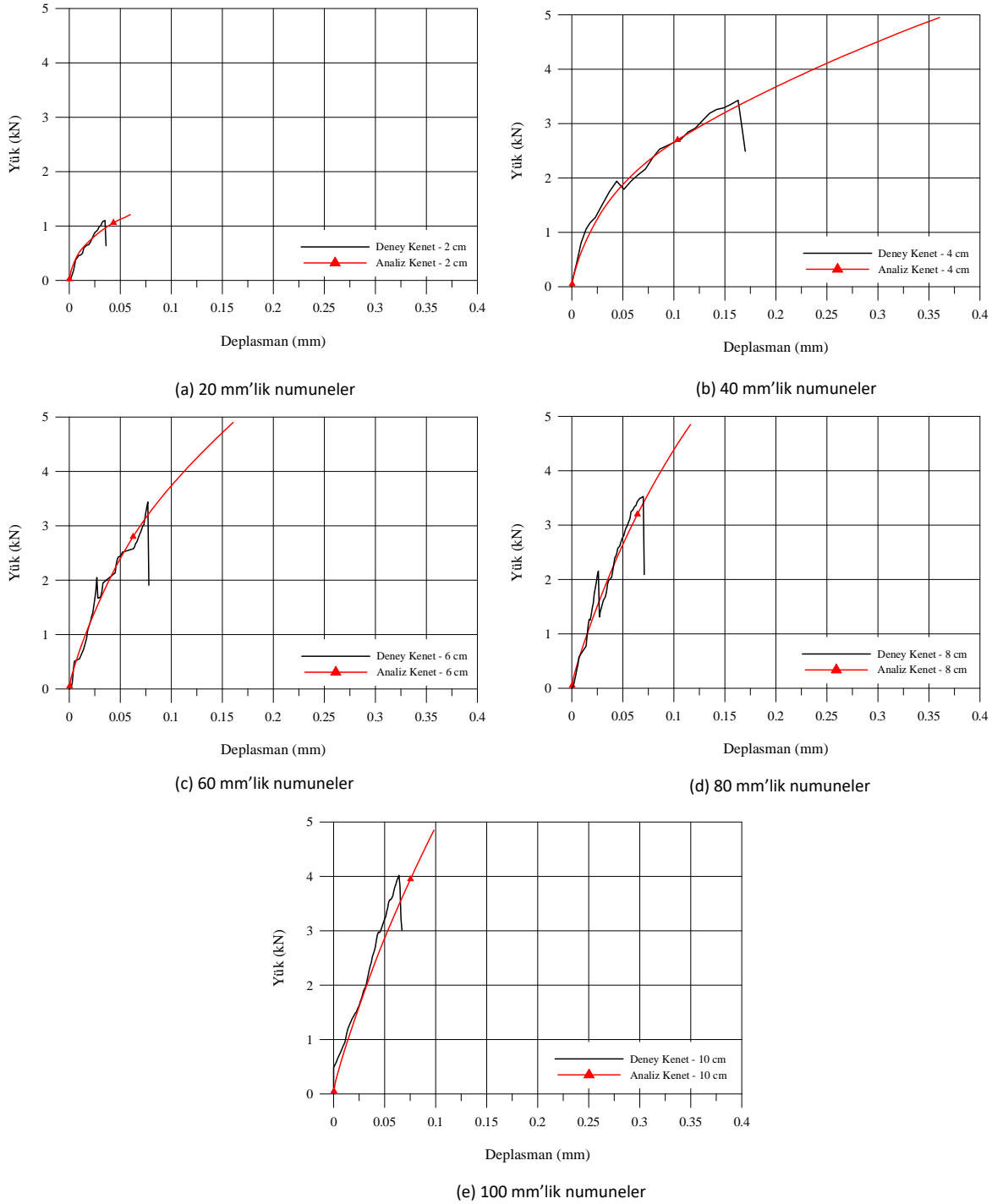
Malzemeler	Özellikler	Değer
Taş	Elastisite Modülü (MPa)	4000
	Poisson Oranı	0.2
	Kohezyon (MPa)	2.5
	İçsel Sürtünme Açısı	25
	Çekmede Kohezyon Eğimi	0.0
	Sürtünme Geriliminin Eğimi	0.0
Kenet	Plastik Şekil Değiştirme	0.001
	Elastisite Modülü (MPa)	203704
	Poisson Oranı	0.3
	Tek Eksenli Akma Gerilmesi (MPa)	275
	Çekmede Pekleşme Eğimi	212.1
	Plastik Şekil Değiştirme	1.0

5. Bulgular ve Tartışma

Şekil 7'de deney sonucunda kenetli modellerin görünümü ve sayısal modellerin maksimum yük altında yapmış oldukları deplasman ve çekme gerilmesi dağılımı verilmiştir. Deney ve analiz sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafikleri ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Deney ve analiz sonuçları doğrultusunda 20 mm'lik model diğer modellere göre daha az yük taşımıştır. Analiz sonucunda batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi 20 mm ve 40 mm olan modellerde çekme gerilmeleri birbirine yakın çıkmıştır. Aynı şekilde kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi 60 mm, 80 mm ve 100 mm olan modellerin çekme dayanımları da birbirlerine oldukça yakındır. Deney ve analiz sonuçlarında elde edilen yük-deplasman grafikleri incelendiği zaman kenetin taşın kenarına olan mesafesi 60 mm, 80 mm ve 100 mm olan modeller birbirine yakın davranış sergilerken 40 mm olan model ise farklı davranış sergilemiştir. Şekil 7'den de görüldüğü gibi kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi azaldıkça, kenetin taş üzerine verdiği hasar artarak daha büyük deformasyonlara neden olmuştur.



Şekil 7. Deney ve sonlu eleman analiz sonuçları.



Şekil 8. Deneysel sonuçları ve sonlu eleman analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

6. Sonuçlar

Zamanla tarihi yapılar, zemin özelliklerinin yetersiz oluşu, doğal afetler, insanlardan kaynaklı sebepler, hatalı malzeme kullanımı, doğal etkenler gibi çeşitli sebeplerden dolayı hasarlara uğramaktadır. Bu hasarların giderilmesi için tarihi yapılarda onarım ve güçlendirme gibi restorasyon çalışmaları yapılmaktadır. Tarihi yapılarda restorasyon

çalışmalarında yapıların özellikle dayanımını artırabilmek amacıyla kenet zıvana gibi metal bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Onarım ve güçlendirme çalışmalarında kenet, zıvana gibi elemanların tasarımını, nasıl uygulanacağını bilmek oldukça önemlidir. Bu çalışmada da kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesinin taşın kayma dayanımını nasıl etkilediği deneysel ve numerik olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışma değişken olarak alınan kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesini incelemek amacıyla her bir modelden 3 adet toplamda 15 adet model üretilerek yapılmıştır. Her bir deneysel modelin sayısal modellemesi de yapılarak deney ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Bağlantı elemanı olarak kullanılan kenetin taşın üzerine etki ettiği yüzey alanı azaldığı için, kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi 20 mm olan modelde kayma yükü diğer modellere göre daha az olmuştur.
- Kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesi 60 mm, 80 mm ve 100 mm olduğu zaman modellerin göstermiş oldukları davranışlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. 40 mm'lik model diğer modellere göre daha sünek bir davranış sergilemiştir.
- Yapılan çalışma sonucunda kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesinin 100x100x200 mm³ boyutundaki taşlar için minimum 40 mm olması gerektiği belirlenmiştir. Farklı boyutlardaki taşlar içinde bu çalışmadan elde ettiğimiz davranışlara benzer sonuçların ortaya çıkacağı düşünülmektedir.
- Deneysel ve numerik çalışmalar sonucunda kenetin batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesinin (h) taşın uzunluğuna (b) oranının (h/b) 0,2 değerinden küçük olmaması sonucuna varılmıştır.
- Bu çalışma, ileride yeni yapılabilecek han, hamam, cami gibi yapıların ya da onarım ve güçlendirilmesi gereken tarihi yapılarda kenetlerin nasıl uygulanması konusunda iyi bir referans olacaktır. Kenet gibi dayanımı arttıran bir diğer metal bağlantı elemanı olan zivana çaplarının taş bloklar veya yığma duvarlar üzerine etkileri araştırılması gereken bir başka konu olarak önerilecektir.

7. Kaynaklar

- Akçaözoğlu, K. ve Akçaözoğlu, S., 2017. The effect of elevated temperature on the lightweight concrete produced by expanded clay aggregate and calcium aluminate cement. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, **1**, **2**, 59-70.
- Baranaydın, F., 2020. Ephesos St. Jean kilisesi kiborion sütunu 1963 yılı restorasyonuna güncel bir yaklaşım. *AMISOS*, **5**, **8**, 31-50.
- Çelik, T., 2020. Tarihi cami kubbelerinde güçlendirme yöntemlerinin deneysel metotlarla incelenmesi. Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 246.
- Dede, T. ve Ayyaz, Y., 2009. Betonun Doğrusal Olmayan Analizinde Kullanılan Kriterler. *Firat University Journal of Engineering*, **21**, **2**, 151-159.
- Doran, B., 2003. Elastic-plastic analysis of R/C coupled shear walls: Theequivalent stiffness satio of the tie elements. *Journal of the Indian Institute of Science*, **83**, 87-94.
- Karabork, T. ve Kocak, Y., 2014. New metal connectors developed to improve the shear strength of stone masonry walls. *Struct. Eng. Mech*, **50**, **1**, 121-135.
- Kurugöl, S. ve Küçük, S.G., 2015. Tarihi eserlerde demir malzeme kullanım ve uygulama teknikleri. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, 521-536.
- Lusas, Finite element analysis software products, Finite Element System FEA Ltd, 2020.
- Smoljanovic, H., Nikolic, A. ve Zivaljic, N., 2015. A finite-discrete element model for dry stone masonry structures strengthened with steel clamps and bolts. *Eng. Struct*, **90**, 117-129.
- Tanriverdi, Ş., Çelik, T., Ural, A. ve Firat F.F., 2018. Investigation of the effect of the clamps with different immersion depth on the masonry wall's behaviour. International Conference on Science and Technology – ICONST, 186-193.
- Tanriverdi, Ş., 2020. Taş kubbelerde pencere boşluğunun ve kasnak yüksekliğinin davranış ve dayanım üzerine etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 157.
- TS EN 772-6, 2004. Kâgir birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1052-3, (2004). Kâgir-deney metodları-bölüm 3: Başlangıç kayma dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 772-1+A1, 2015. Kâgir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: Basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN ISO 6892-1, (2020). Metalik malzemeler-çekme deneyi-bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Ural, A. Ve Kara, M.E., 2015. Kenet ve zıvanaların yığma duvarların kesme (kayma) davranışına etkisi. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, 537-548.

Uslu, S. 2013. Tarihi yığma yapılarda kullanılan metal bağlantı elemanlarının deneysel metotlarda incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 101.

Vermeer, P.A. ve Borst De, R., 1984. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, **29**, **3**, 3-64.

Yılmaz, M., ve Tek, S. 2018. Antalya Yivli Minare ve Camisinin restorasyon, güçlendirme ve zemin etüt çalışmaları. *MASROP E-Dergi*, **12**, **1**, 49-72.

Kazınmış Asfalt Malzemelerin İri Agrega Yerine Kısmen İkame Edilmesinin Farklı Isı Altındaki Betonların Basınç Dayanımlarına Etkisi

Mehmet Fatih ŞAHAN^{1*}, Aysun Dilan POLAT², Osman GÜNAYDIN³

^{1,3} Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman.

² Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adıyaman.

*Sorumlu yazar e-posta: mfs@adiyaman.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3334-3945>
e-posta: dilangergerli@hotmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6397-0421>
e-posta: gunaydin@adiyaman.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7559-5684>

Geliş Tarihi: 05.02.2021

Kabul Tarihi: 10.06.2021

Öz

Bu çalışmada doğal agrega kullanımının azaltılması ve oluşan atık malzemelerin geri dönüştürülmesine katkı sağlamak amacıyla karayolu kaplamalarının kazınması sonucu ortaya çıkan kazınmış asfalt malzemelerin (KAM) beton karışımında iri agrega yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca, KAM ikameli betonların bulunduğu ortam sıcaklığı değişiminin basınç dayanımına etkisi de araştırıldı. Bu amaçla 4.0-22.4 mm boyutlarındaki KAM, aynı boyutlardaki agrega yerine beton hacminin % 5, 10, 20 ve 30 oranlarında ikame edildi. Bu şekilde üretilen küp (150 mm) numuneler 28 günlük kürün ardından 24 saat süreyle belirli bir sıcaklıkta (bir set 25 °C, bir set 50 °C ve bir set de 75 °C) bekletildi ve ardından basınç testleri yapıldı. Basınç dayanımları incelendiğinde gerek KAM ikamesinin gerekse ortam sıcaklığının artırılmasının beton dayanımına olumsuz etkisi gözlemlenmiş olmakla birlikte dayanımları C20/25 ve C30/37 arasında betonlar üretilebilmektedir. Bu çalışma sonucunda karayollarının yenilenmesi veya tamiri sonucunda ortaya çıkan atıkların iri agrega yerine ikame edilerek değerlendirilebileceği gösterilmiştir. Kazınmış asfalt malzemelerin sadece elenmesi suretiyle maliyetsiz olarak geri dönüştürülmesi sonucunda hem çevrenin korunmasına katkı sağlanacak hem de doğal agrega kaynaklarının hızlı tüketimi engellenecektir.

Anahtar kelimeler

Geri dönüşüm;
Kazınmış asfalt malzeme; Basınç dayanımı; Sıcaklık etkisi

The Effect of Partial Replacement of Scraped Asphalt Pavements by Coarse Aggregate on the Compressive Strength of Concrete Under Various Temperatures

Abstract

In this study, in order to reduce the use of natural aggregate, the use of reclaimed asphalt pavements (RAP) obtained as a result of scraping of road pavements was investigated in the concrete mix instead of coarse aggregate by simply sieving it. In addition, the effect of the change of ambient temperature in RAP substituted concretes on compressive strength was also investigated. In the experiments for this purpose, the scraped asphalt pavement with dimensions of 4.0-22.4 mm was replaced with aggregate of the same dimensions in the ratio of 5, 10, 20 and 30% of the concrete volume. Cube specimens (150 mm) produced at these ratios were kept at a certain temperature (one set 25 °C, one set 50 °C and one set 75 °C) for 24 hours after 28 days of curing and then compressive tests were performed. When the compressive strength is examined; Although it has been observed that both RAP substitution and increasing the ambient temperature have a negative effect on concrete strength, concrete with strengths between C20/25 and C30/37 can still be produced. With this study, it has been shown that the wastes generated as a result of the renovation or repair of highways can be utilized by substituting for coarse aggregate. As a result of recycling scraped asphalt materials cost-free by only sieving them, both the environmental protection will be contributed and the rapid consumption of natural aggregate resources will be prevented.

Keywords

Recycling; Reclaimed asphalt pavement; Compressive strength; Temperature effect

1. Giriş

Atık malzemelerin geri dönüşümü konusu inşaat mühendisliği çerçevesinde ele alındığında; doğal agrega ocakları azalmaya başlamış ve yenilenen/yenilenecek yapılar nedeniyle oluşan atık malzemelerin imha edilmesi de ayrıca maliyet getirmeye başlamıştır. Bu nedenle geri dönüştürülmüş malzeme içeren beton düşüncesi konuşulmaya başlanmış ve bu hususta pek çok araştırma yapılmıştır. Betonun yaklaşık olarak $\frac{3}{4}$ 'ünün agrega olduğu dikkate alındığında geri dönüştürülerek ya da doğrudan betonda kullanılabilir atıkların agrega yerine ikame edilmesinin ne denli kritik olduğu ortaya çıkar. Yıllar içinde kullanılarak eskiyen ya da bozulan karayollarının onarımı ya da yenilenmesi gerekmektedir. Bu onarım ya da yeniden yapım sonucunda çok büyük miktarda bitümlü agrega malzemesi ortaya çıkmaktadır. Bu tür malzemelerin geri dönüştürülmesi ya da doğrudan kullanılması agregaya en çok ihtiyaç duyulan sektörlerden biri olan inşaat sektörü için çok önemli avantajlar sağlayabilir.

Yaşlanarak bozulan asfalt yollarda üst kaplama kazınarak alınır ve bunun yerine yeni asfalt karışımı serilerek sıkıştırılır. Kazınan asfalt kaplamalar genelde atık malzeme sahalarında depolanmaktadır. Açık sahalarda depolanan kazınmış asfalt malzemeler (KAM) içerisindeki petrol esaslı bitüm nedeniyle zaman içinde farklı mevsim şartları nedeniyle yeraltı sularına zarar verebilmekte ve yeraltı sularımız kirlenebilmektedir. Yollarının bakım ve onarımında kullanım ömrünü tamamlamış olan yol üstyapısında kullanılmış kaplama malzemesi bazı işlemlerden sonra yeniden değerlendirilmektedir (Salta, 2010). Bozulmuş asfalt kaplamaların kazınarak yeniden kullanılması ile yeni malzeme ihtiyacında azalma olur. Böylece doğal kaynakların korunmasına ve atık sahalarının oluşumunun engellenmesine katkı sağlanmış olunur (Güngör vd. 2008). Kazınmış atık asfalt malzemelerin beton karışımında agrega ile birlikte kullanılmasıyla hem atık sahaların oluşumu engellenebilir hem de doğal agregaların daha az kullanılması ile ekonomiye katkı sağlanabilir (Işıkdag 2010).

Son zamanlarda atık malzemelerin beton karışımında kullanılabilirliği uygulamaları oldukça yaygın hale gelmiştir. Beton içerisinde kullanılan atık malzemeler agrega veya katkı olarak değerlendirilmektedir. Kazınmış asfalt malzemelerin mevcut yolların bakımında ya da yeni yolların yapımında bitümlü sıcak karışımın içerisinde tekrar kullanılması oldukça yaygın bir kullanım şeklidir (Işıkdag 2009).

Gürer vd. (2004) çalışmalarında inşaat endüstrisinde geri dönüşüm yapılabilen malzemelerden bahsedilerek, atıklarının bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilme şekilleri anlatılmış ve Dünya'daki uygulamalarından bahsedilmiştir. Talep ve tüketim açısından bakıldığında geri dönüşümün özellikle inşaat alanında yaygın bir şekilde uygulanmasının önemli miktarlarda ekonomik ve hammadde kaynağı sağlayacağı görülebilir. Akçaözoğlu (2008) çalışmasında atık PET şişe kırıklarının hafif harç üretiminde agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çelik ve Gürdal (2005) yapmış oldukları çalışmada yarfıstığı hafif agregası kullanılarak üretilen çimento bağlayıcılı hafif malzemenin değişen agrega miktarına bağlı olarak mekanik mukavemetleri incelenmeye çalışılmıştır. Kılıçoğlu (2013) yapmış olduğu çalışmada, atık camları çimento üretiminde ve beton içerisine cam tozu ya da cam agrega olarak kullanarak geri dönüştürmeyi hedeflemiştir. Özer (2012) çalışmasında endüstriyel atık malzemelerden tuğla tozu, uçucu kül, mermer tozu ve taş tozunun mineral katkı malzemesi olarak betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kılcallık ve aşınma gibi özelliklerine etkisi karşılaştırmalı olarak irdelemiştir. Demir (2009) genel olarak inşaat yıkıntı atıkları, özelde ise beton atıklarının kaynakları, geri dönüşümü ve kullanımını gerektiren ekonomik, teknik ve çevresel sebeplerini incelemiştir. Geri kazanılmış agreganın bazı teknik özelliklerini ve kullanım alanlarını, geri kazanılmış agrega ile yapılan betonların özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmaları incelemiştir. Güngör vd. (2018) çalışmalarında zamanla bozulmuş olan yol üstyapısının onarımı için önceden kazınmış asfalt kırıklı agregaların yeni yapılacak bitümlü sıcak karışım imalatında kullanılmasını ele almışlardır. Işıkdag (2009) yapmış olduğu bu çalışmada atık

asfalt kırıklarının beton ve harç numunelerde agregaya yerine uygun kullanım oranlarını araştırmış olup beton yollarda kullanım uygunluğunu irdelemiştir. Akpınar (2005) çalışmasında asfalt kırıklı agregaların beton içerisinde agregaya olarak değerlendirilmesi araştırılmıştır. Huang vd. (2005) çalışmalarında, KAM katkılı betonunun mekanik özelliklerini laboratuvar deneyleri ile incelenmişlerdir. Çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile KAM'ın geleneksel ekipman kullanmak suretiyle prosedürlerde herhangi bir değişiklik yapılmadan Portland çimento betonuna dahil edilebileceğini göstermişlerdir. Herhangi bir işlem olmaksızın, betona RAP eklenmesiyle basınç ve ayırık gerilme mukavemetlerinde sistematik bir azalma olmaktadır. Çalışma ile, KAM içeren betonun enerji tüketme tokluğunu önemli ölçüde iyileştirilmişlerdir. Shi vd. (2017) çalışmalarında işlenmemiş iri agregaların kaba KAM ile kısmen değiştirilip değiştirilemeyeceğinin ve akabinde Portland çimentolu beton kaplamalarda bu tür karışımları formüle etmek için pratik ve uygun bir seçenek olup olmadığını araştırmışlardır. Sonuçta, işlenmemiş iri agregayı yeterli orta büyüklükteki kaba KAM ile değiştirmenin faydalı olduğunu göstermişlerdir. Singh vd. (2017) toz, asfalt film vb. kirlenici maddeleri uzaklaştırmak için bir yüzey temizleme yöntemi olan aşınma ve yıpranma yöntemini kullanılarak KAM'lerin beton kaplamalarda kullanımının artırılması için bu boşlukları doldurmaya çalışılmışlardır. Doğal Agregaların kısmen farklı oranlarda KAM agregaları ile ikame edilmesi ile farklı karışımlar hazırlamışlardır. Kirli KAM agregalarının aşınma yıpranma yöntemi ile işlenmesinin, kirlenici maddeleri önemli ölçüde giderebileceği, bunun sonucunda agregaya ve hidratlı harç matrisinin arayüzünde daha güçlü bağlanma sergilendiğini ortaya koymuşlardır. Shi vd. (2021) KAM içeren Portland çimentolu betonlar için kırılma modülü, elastisite modülü, Poisson oranı, termal genleşme katsayısı, yoğunluk ve termal özellikler dahil pek çok özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesine yönelik çalışma yürütmüşlerdir.

Yukarıda verilen literatürden de anlaşılacağı üzere kazınmış asfalt malzemelerin geri dönüştürülmesi üzerine pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen

kazınmış asfalt malzemelerin betonda agregaya yerine ikame edilmesini içeren çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bununla birlikte yazarların bilgisi dahilinde kazınmış asfalt malzemelerin betonda kullanıldığı ve dış ortam ısılarının mevsim normallerinin çok üzerinde yükseldiği durumların KAM ikameli betonların davranışına etkisinin de araştırıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada KAM'ın sadece elenmek suretiyle farklı dış ortam ısılara maruz saha betonlarında agregaya yerine ikame edilmesinin beton davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler için KAM'ler hiçbir işleme tabi tutulmadan elenmiş ve 4.0-22.4 mm elek arası kullanılmak üzere alınmıştır. Deneylerde; KAM, iri agregaya yerine % 5, 10, 20 ve 30 oranlarında kullanılmış ve farklı beton karışımları üretilmiştir. Çalışma doğrultusunda farklı ortam ısılara maruz, bir set 25 °C, bir set 50 °C ve bir set 75 °C, beton numuneleri üzerinden KAM ikameli betonların davranışları araştırılmıştır. Bu çalışmada betonda KAM ikamesinin yalnızca betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. KAM ikamesi ile betonun durabilitesinden diğer dayanım göstergelerine kadar pek çok parametre de büyük oranda değişimler gözlemlenebilecektir. Basınç dayanımı dışındaki diğer konular bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.

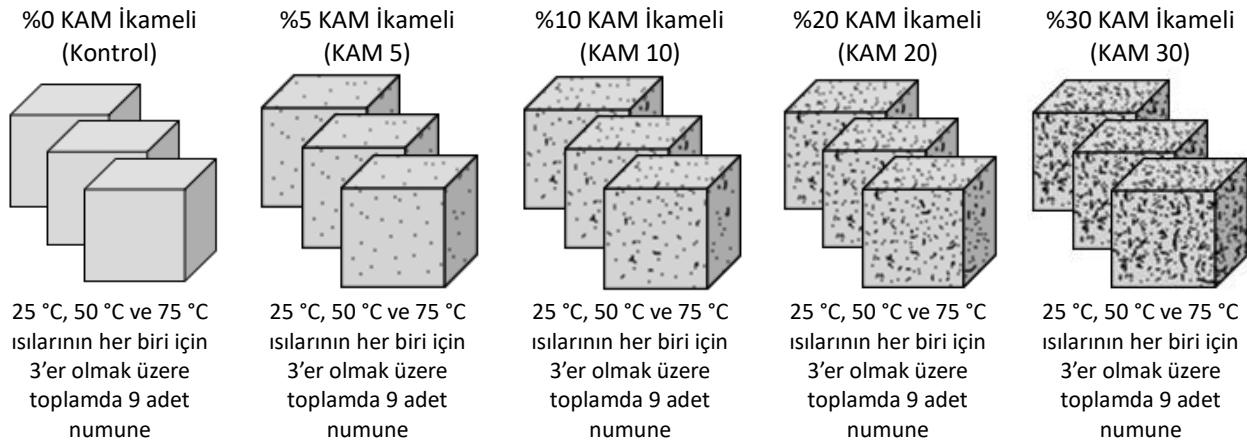
2. Materyal ve Metot

Yapılan deneysel çalışmalar, kazınmış asfalt malzemenin beton içerisinde iri agregaya yerine toplam agregaya hacminin %5, 10, 20 ve 30 oranlarında ikame edilerek üretilen betonların kullanılabilirliğinin araştırılmasına ve hazırlanan beton numunelerin farklı sıcaklık etkisi (Bir set 25 °C, bir set 50 °C ve bir set 75 °C ısıya maruz bırakılmıştır.) altındaki davranışlarının araştırılmasına yöneliktir. Hazırlanan beton karışımlarında iri agregaya %60 ince agregaya ise %40 oranında kullanılmıştır. Kullanılan iri agreganın %50'si 11.2–22.4 mm boyutlarında kırmataş, %50'si ise 4.0–11.2 mm boyutlarında kırma taştır. Beton üretimlerinde Karayolları 57. Şube Şefliği'nden temin edilen KAM kullanılmıştır. Beton karışımında kullanılan çimento dozajı ise 350 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Beton karışımı için

kontrol numuneleri (3 adet), CEM II/A-M(P-LL) 42.5 R Portland Kompoze çimento çimentosu (Ç), dere kumu 0–4 mm (K), 11.2–22.4 mm kırmataş (KT I) ve 4–11.2 mm kırmataş (KT II) kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarında iri agregaya (KT I ve KT II) %60 ince agregaya (K) ise %40 oranında kullanılmıştır. Kullanılan iri agreganın %50'si 11.2–22.4 mm boyutlarında kırmataş, %50'si ise 4.0–11.2 mm boyutlarında kırmataştır. KAM katkılı karışımlarda KT I ve KT II kırmataşlarının yerine hacimce %5 (KAM 5), %10 (KAM 10), %20 (KAM 20) ve %30 (KAM 30) oranlarında KAM kullanılmış ve KAM ikameli 4 farklı karışım elde edilmiştir. Shi vd (2017) araştırmalarındaki ön çalışmaya dayanarak % 40'a varan hacimsel ikame seviyesinin güvenli olduğunu bulmuştur. Bu çalışmada bu güvenli sınıra çok yakın çalışılarak %5, %10, %20 ve %30 değerleri seçilmiştir. Burada Kontrol ve her farklı KAM ikame oranları için 3 numune olmak üzere 25 °C ısıya maruz kalacak 3 adet küp numune, 50 °C ısıya maruz kalacak 3 adet küp numune ve 75 °C ısıya maruz kalacak 3 adet küp numune olmak üzere toplamda 45 adet küp numune üretilmiştir (Şekil 1). Karışımlardaki agregaların hacim oranları Çizelge 1'de beton karışımları için

kullanılan agregaların özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Deneysel çalışmada basınç dayanımlarının belirlenmesi ve birbirleri ile karşılaştırılması amacıyla kontrol karışımı ve farklı KAM ikame oranlarında karışımları ile beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan 150 mm'lik kontrol ve KAM ikameli küp numuneler 24 saat oda ısısında bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve ardından 28 gün süreyle havuzda küre tabii tutulmuştur. 100 mm'lik küp numuneler, 28. günün sonunda küre havuzundan çıkarılarak her bir farklı karışım için birer set oda ısısında, birer set 50 °C ısıdaki etüvde ve birer set ise 75 °C ısıdaki etüvde 24 saat süreyle bekletilmiştir. Işıkdag (2009) yaptığı çalışmada KAM ikameli betonları 3 saat süreyle 100 °C, 300 °C, 450 °C ve 600 °C sıcaklıklarda bekletmiş ve sıcaklık etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada 600 °C'ye göre çok daha düşük olana 25 °C, 50 °C ve 75 °C sıcaklıklar ele alındığından 3 saat sürenin bu sıcaklıkların etkisini gösteremeyeceği öngörülerek tam gün süresince sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. 24 saat etüvde bekleyen numuneler çıkarılarak basınç dayanımı deneylerine (TS EN 12390-3, 2010) tabii tutulmuştur.



Şekil 1. Üretilen Numune Sayıları ve Dağılımları

Çizelge 1. KAM ikameli Karışımlardaki Agregaya Hacim Oranları

Karışımlar	Dane Boyutlarına göre Agregaların Hacim Oranları (%)			
	Kum (K) (0–4 mm)	Kırmataş (KT II) (4–11.2 mm)	Kırmataş (KT I) (11.2–22.4 mm)	Kazınmış Asfalt Malzeme (KAM) (4–22.4 mm)
%0 KAM ikameli (Kontrol)	40	30	30	0
%5 KAM ikameli (KAM 5)	40	27.5	27.5	5
%10 KAM ikameli (KAM 10)	40	25	25	10
%20 KAM ikameli (KAM 20)	40	20	20	20
%30 KAM ikameli (KAM 30)	40	15	15	30

Çizelge 2. Beton Karışımları İçin Kullanılan Agregaların Özellikleri

Malzeme	Özgül Ağırlık (t/m ³)	Su Emme Oranları (%)	Doğal Nem Oranları (%)	Hacimce Agrega oranları (%)
Kırmataş 11.2–22.4 mm (KT I)	2.60	1.50	0.08	30
Kırmataş 4–11.2 mm (KT II)	2.60	1.75	0.08	30
Kum 0–4 mm (K)	2.70	1.50	0.18	40
Kazınmış Asfalt Malzeme 4–22.4 mm (KAM)	2.42	0.70	0.05	

3. Bulgular

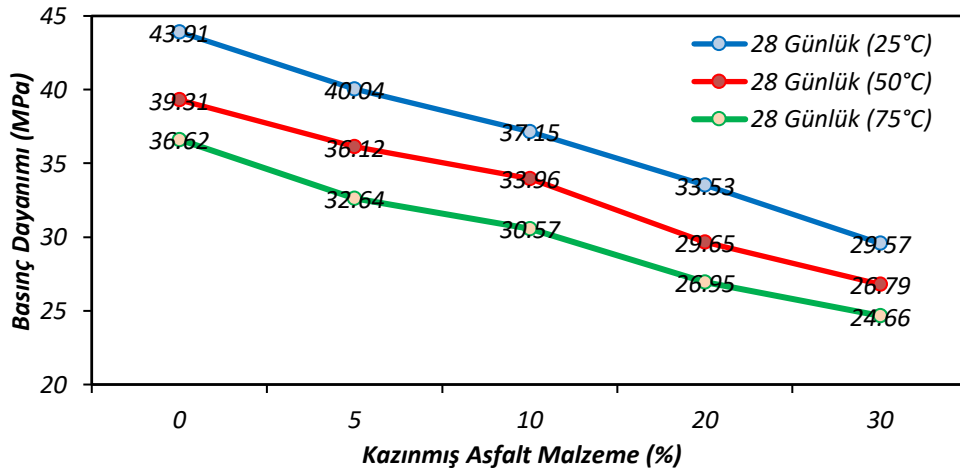
Farklı KAM oranı ikamelerine göre üretilen küp numunelerin 28 günlük kür sonunda 24 saat süreyle ısıya maruz kalmış haldeki basınç dayanımları Çizelge 3'te verilmiştir. Isıya Maruz Kalmış Haldeki KAM İkameli Betonların Basınç Dayanımlarının İkame Edilen KAM Oranı ile Değişim Grafiği ise Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 3'te verilen değerler ile Şekil 2'de verilen grafik incelendiğinde 25 °C ısıya maruz Kontrol numunelere %5 oranında KAM ikame edilmesiyle elde edilen numunelerin basınç dayanım değerinde %8.8 oranında azalma gözlemlenirken Kontrol numunelere %30 oranında KAM ikame edilmesiyle

elde edilen numunelerin basınç dayanım değerinde %32.7 oranında bir azalma gözlenmiştir. 50 °C ısıya maruz Kontrol numunelere %5 oranında KAM ikame edilmesiyle elde edilen numunelerin basınç dayanım değerinde %8.1 oranında azalma gözlemlenirken Kontrol numunelere %30 oranında KAM ikame edilmesiyle elde edilen numunelerin basınç dayanım değerinde %31.8 oranında bir azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde 75 °C ısıya maruz Kontrol numunelere %5 oranında KAM ikame edilmesiyle elde edilen numunelerin basınç dayanım değerinde %10.9 oranında azalma gözlemlenirken Kontrol numunelere %30 oranında KAM ikame edilmesiyle elde edilen numunelerin basınç dayanım değerinde %32.7 oranında bir azalma gözlenmiştir.

Çizelge 3. Isıya Maruz Kalmış Haldeki KAM ikameli Betonların Basınç Dayanımları

Karışımlar	Ort. Basınç Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımındaki Azalmalar (%)		
	25 °C ısıda	50 °C ısıda	75 °C ısıda	25 °C ısıda	50 °C ısıda	75 °C ısıda
KONTROL	43.91	39.31	36.62	0.0	0.0	0.0
KAM 5	40.04	36.12	32.64	8.8	8.1	10.9
KAM 10	37.15	33.96	30.57	15.4	13.6	16.5
KAM 20	33.53	29.65	26.95	23.6	24.6	26.4
KAM 30	29.57	26.79	24.66	32.7	31.8	32.7

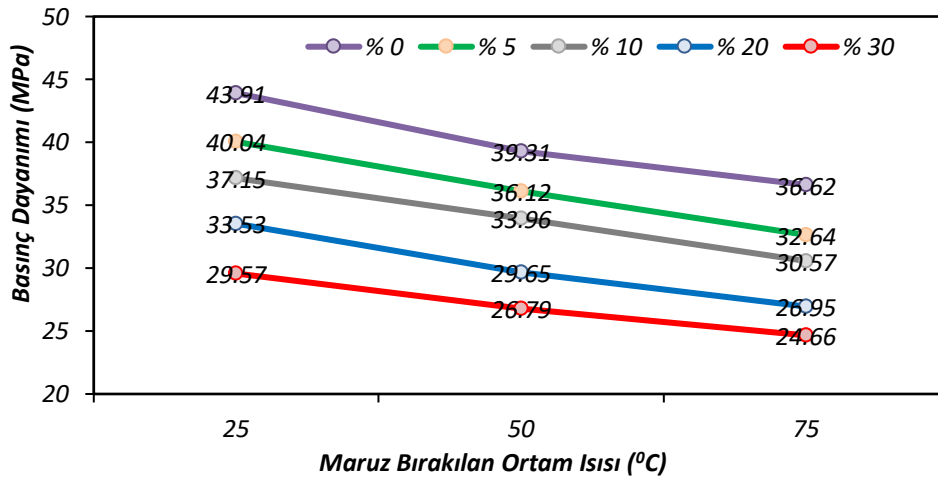


Şekil 2. Isıya Maruz Kalmış Haldeki KAM İkameli Betonların Basınç Dayanımlarının İkame Edilen KAM Oranı ile Değişimi

Şekil 3'teki grafikte yer alan tüm değerler incelendiğinde kür sonunda maruz bırakılan ısının 25-75 °C arasında olması durumunda ikame edilen KAM oranının artması beton basınç dayanımına olumsuz etkilemekte ve betonun basınç dayanımını azaltmaktadır. Bu azalma oranı 25 °C, 50 °C ve 75 °C ısılar için sırasıyla 32.7, 31.8 ve 32.7'dir. buradan görüleceği üzere basınç azalması maruz kalınan 25 °C, 50 °C ve 75 °C ısılarından bağımsız olup tamamen ikame edilen KAM miktarında bağlıdır. KAM ikameli beton karışımında yer alan 4 mm dane boyutundan daha büyük boyuttaki agregaların bir kısmının -ki bu çalışmada bu oran %5 ile %30 arasındadır- yüzeyleri bitüm ile kaplıdır. Betonun agregaya ile çimento hamurundan oluşan iki fazlı bir kompozit malzeme olduğu dikkate alındığında; heterojen bir malzeme olan betonun dayanımı çimento hamurunun, agreganın ve ara yüzeyin dayanımlarına bağlıdır. Ancak agregaya ile çimento ara yüzeyinin sertleşmiş

betondaki en kritik bölge olduğu düşünülmektedir. (Popovics 1998). Yüzeyleri bitüm ile kaplanmış olan agregaların çimento hamuru ile oluşturduğu ara yüzeylerin dayanımlarının bitümsüz agregalardaki ara yüzey dayanımlarından daha az olacağı tahmin edilmektedir. Bu durum dikkate alındığında KAM ikameli numunelerin dayanımlarının kontrol numunelerine göre daha düşük çıkmasının nedeninin bazı agregaların yüzeylerinin bitüm ile kaplı olduğu ve bu durumun çimento hamuru ile agregaya arasındaki ara yüzeyin dayanımının daha düşük olmasına sebep olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3'te 28 günlük kür sonunda farklı ısıya maruz kalmış beton numunelerinde agregaya yerine KAM ikame edilmesiyle elde edilen basınç dayanımlarının maruz kalınan ısıya göre değişimlerinin grafiksel karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 3. KAM ikameli Betonların Basınç Dayanımlarının Maruz Kalınan Isı ile Değişimi

Şekil 3 incelendiğinde numunelerin kontrol serisinde 25 °C ısıya maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı 43.91 MPa iken kür sonunda maruz bırakılan ısının 75 °C olmasıyla basınç dayanımı 36.62 MPa değerine düşmektedir. Beton serilerinde agregaya yerine kazınmış asfalt malzeme miktarının %5 oranında artırılmasıyla üretilen numunelerde 25 °C ısıda basınç dayanımı 40.04 MPa iken 75 °C ısıda 32.64 MPa, agregaya yerine %10 oranında KAM ikame edilmesiyle üretilen numunelerde 25 °C ısıda 37.15 MPa olan basınç dayanımı 75°C ısıda 30.57 MPa, agregaya yerine KAM miktarının %20 oranında ilave edilmesiyle üretilen numunelerde 25 °C ısıda

33.53 MPa olan basınç dayanımı 75 °C ısıda 26.95 MPa değerine düşmektedir. Kontrol karışımına agregaya yerine %30 oranında KAM ilave edilmesiyle üretilen numunelerde ise 25 °C ısıda 29.57 MPa olan basınç dayanımı değeri ısının 75 °C'ye yükselmesiyle 24.66 MPa değerine kadar düşmektedir. Kontrol numunelerde ısı artışıyla basınç dayanımı değerlerinde yaklaşık olarak %16.6 oranında bir azalma gözlenirken kazınmış asfalt malzeme oranının artırılmasıyla KAM5 numunelerde basınç dayanımı değerlerinde %18.5, KAM10 numunelerde %17.7, KAM20 numunelerde %19.6 ve KAM30 numunelerde ise %16.6 oranında azalma meydana

gelmiştir. Şekil 4'te verilen grafikten anlaşılacağı üzere gerek Kontrol numunelerinde gerekse KAM ikameli numunelerde Kür sonunda maruz bırakılan ısının artması betonun dayanımını olumsuz etkilemekte ve betonun basınç dayanımı azalmaktadır. Çimento hamurunun ısıtma boyunca oldukça kararsız bir bileşen olduğu düşünüldüğünde sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirecektir. Bu dönüşümler 100 °C ve altındaki ısılarda serbest suyun buharlaşması ile 100 °C'nin üstündeki ısılarda ise hem bağlı suyun kaybolması hem de kimyasal bozulma olarak gerçekleşecektir (Khoury, 1992). Bu çalışmada beton numuneleri 24 saat süreyle 25 °C ile 75 °C ısıya maruz kaldığından basınç dayanım azalmasının serbest suyun buharlaşması sonucu olduğu düşünülmektedir.

Elde edilen basınç dayanımı değerleri dikkate alındığında, agregaya yerine KAM ikame miktarının artırılmasıyla basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Fakat yine de kazınmış asfalt malzeme kullanımı sonucunda elde edilen betonun yeterli basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, yolların yenilenmesi veya tamir edilmesi amacıyla eskiyen ve bozulan bölgelerin kazınması sonucu ortaya çıkan asfalt kaplamaların betonda iri agregaya yerine ikame edilebilme potansiyeli araştırılmıştır. Atık malzemelerin dönüştürülmesine katkı sağlamak için yapılan bu çalışmada, kazınmış asfalt malzeme hiçbir işleme tabi tutulmadan sadece elenerek 4–22.4 mm arasında kalanı alınmış ve %5, 10, 20 ve 30 oranlarında iri agregaya yerine ikame edilerek 350 dozajlı betonlar üretilmiştir. Üretilen bu betonlar farklı dış ortam sıcaklıklarında bekletilmiş basınç testlerine tabi tutularak basınç dayanımları elde edilmiştir.

4.1 Sonuçlar

Beton karışımına iri agregaya yerine KAM ikame edilmesi ile betonun dayanımında azalma görülmüştür. Bu durum dikkate alındığında KAM ikamesinin agregaya yüzeyindeki bitüm sebebiyle agregaya ile çimento hamuru ara yüzeylerinin basınç

dayanımlarını azalttığı ve böylece KAM ikameli betonların basınç dayanımlarının azaldığı kanısına varılmıştır.

Gerek Kontrol betonların gerekse KAM ikameli betonların basınç dayanımlarının maruz bırakılan ortam ısının (50-75 °C) artması sonucunda azaldığı belirlenmiştir. Bu durum dikkate alındığında maruz bırakılan 50-75 °C ısısının betondaki serbest suyun azalmasına sebep olması sonucunda betondaki boşlukların arttığı ve böylece basınç dayanımının azaldığı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda KAM ikamesinin miktarlarına bağlı olarak dayanımları C20/25 ve C30/37 arasında betonların üretilebileceği ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak kazınmış asfalt malzemelerin betonda iri agregaya yerine kısmen ikame edilmesi ile yüksek dayanım gerektirmeyen beton üretilebileceği ve böylece karayollarının yenilenmesi veya tamiri sonucunda ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülmesi sağlanmış olunarak doğal kaynakların korunmasına ve ülke ekonomisine katkıda bulunulacaktır.

4.2 Öneriler

Bu çalışmada betonda iri agregaya KAM ikamesinin yalnızca betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Betonda iri agregaya yerine KAM ikamesi sonucunda betonun durabilitesinden diğer dayanım göstergelerine kadar pek çok parametre de büyük oranda etkilenebilecektir. Bu parametrelerin ayrıca değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MÜFMAP/2017-0001 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

Akçaözöğlü, S., 2008. Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 283.

- Akpınar, A.F., 2005. Asfalt kırığı agregalı betonların mekanik özellikleri, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 89.
- Çelik, Ç., Gürdal, E., 2005. Yerfıstığı kabuğunun agregaya olarak kullanım olanakları, *İTÜ Dergisi*, 4 (1), 37-46.
- Demir, İ., 2009. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi . *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 9 (2) , 105-114.
- Güngör, A.G., Orhan, F., Kaşak, S., Dost, Y., 2008. Kazınmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanılması, *Karayolu 1. Ulusal Kongresi*, Ankara.
- Gürer, C., Akbulut, H., Kürklü, G., 2004. İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammade Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi, 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, s. 28-36.
- Huang, B., Shu X., Li G., 2005 Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, 35; 2008 – 2013
- Işıkdağ, B., 2009. Atık asfalt kırıklarının beton yollarda agregaya yerine kullanılmasının araştırılması, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 156.
- Khoury, G.A., 1992. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research*, 44 (161), 291-309.
- Kılıçoğlu, C., 2013. Cam atıklarının betonda agregaya ve çimento yerine kullanımı, Doktora tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 172.
- Özer, Y.F., 2012. Bazı endüstriyel atıkların betonun mekanik özellikleri etkisi, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 123.
- Popovics, S., 1998. Strength and Related Properties of Concrete-A Quantitative Approach, John Wiley and Sons Inc. Publications, 298-299
- Salta, İ., 2010. Bitümlü karışımların geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 151.
- Shi, X, Mukhopadhyay A., Liu, K-W., 2017. Mix design formulation and evaluation of portland cement concrete paving mixtures containing reclaimed asphalt pavement", *Construction and Building Materials*, 152; 756-768.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., Huang, K., 2021. Performance evaluation of jointed plain concrete pavement made with portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22(1), 59-81
- Singh, S. , Ransinchung, G. , & Kumar, P. 2019. Feasibility study of RAP aggregates in cement concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design* , 20 (1), 151–170.
- TS EN 12390-3, 2010 Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035603 (668-680)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035603 (668-680)

DOI: 10.35414/akufemubid.856192

Araştırma Makalesi / Research Article

Düşük Plastisiteli Killi Zeminlerin Kıvam Özelliklerinin Tahmininde Rastgele Orman Yöntemi

Zülal AKBAY ARAMA¹, Seyidcem KARAKAŞ¹, Said Enes NURAY¹, Oğuzhan ALTEN², Muhammed Selahaddin AKIN³, Hazal Berrak GENÇDAL⁴

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

² GEODATA Engineering S. p. A., İstanbul.

³ Kartal Belediyesi, Kartal, İstanbul.

⁴ İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul.

Sorumlu yazar e-posta: zakbay@iuc.edu.tr
seyidcem.karakas@ogr.iu.edu.tr
enesnuray1@hotmail.com
altenogu@gmail.com
msehahaddinakin@gmail.com
h.gencdal@iku.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8185-7329>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6250-4501>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2333-2687>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7798-7005>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1980-1812>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1041-5643>

Geliş Tarihi: 07.01.2021

Kabul Tarihi: 26.06.2021

Öz

Anahtar kelimeler

Düşük plastisiteli killer;
Rastgele orman yöntemi;
Karar ağaçları;
Plastisite indisi;
Likit limit

Bu çalışma kapsamında, düşük plastisiteli killi zeminlerin kıvam özelliklerinin tahmininde Rastgele Orman yönteminin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil sınıfında yer alan 665 adet zeminin likit, plastik limit ve su muhtevası deney sonuçları derlenerek bir veri seti oluşturulmuştur. Python yazılımı kullanılarak yapılan tek ve çok değişkenli regresyon analizlerinde likit limit, derinlik, su muhtevası ve doğal birim hacim ağırlığı değerleri bireysel veya gruplar halinde girdi parametreleri olarak değerlendirilmiş ve plastisite indisi tahminindeki etkinlikleri araştırılmıştır. Aynı zamanda, laboratuvar verilerinin tutarsızlık durumları veya belirli bir eğilim izlememesi sebebi ile ortaya çıkan tahmin oranı azalmasına dikkat çekilerek, bu oranlarının Rastgele Orman yöntemi ile nasıl yükseltilebileceği konusu da incelenmiştir. Sonuçlar, Rastgele Orman yönteminin düşük plastisiteli kil zeminlerin plastisite indisi değerinin tahmininde kullanılabilir nitelikte olduğunu göstermektedir.

The Random Forest Method to Predict the Consistency Characteristics of Low Plastic Clayey Soils

Abstract

Keywords

Low plastic clays;
Random forest method;
Decision trees;
Plasticity index;
Liquid limit

Within the scope of this study, the applicability of the Random Forest Method in the prediction process of the consistency properties of low plastic clayey soils was evaluated. For this purpose, a data set was created by compiling the liquid limit, plastic limit, and water content test results of 665 soils. These soils were classified as low plastic clayey soils according to the Unified Soil Classification System. Univariate and multivariate regression analyzes were performed using Python software. The liquid limit, depth, water content, and natural unit weight values were evaluated individually or in groups as input parameters and their effectiveness in plasticity index estimation was investigated. At the same time, by drawing attention to the decrease in the estimation rate caused by the inconsistency of the laboratory data or not following a certain trend, the issue of how these rates can be increased by the Random Forest method was also examined. Consequently, it is shown that the Random Forest method can be used for the estimation of the consistency properties of low plastic clayey soils.

1. Giriş

Geoteknik projelendirilmenin asli hedefi olan zemin-yapı etkileşim sürecinin öngörülmesi standart mühendislik uygulamaları kapsamının ötesinde, oldukça zor bir iştir. Tasarımın başarısı, gerçek davranışın tahminindeki başarı seviyesine büyük ölçüde bağlı olmakla birlikte gerek zeminin çok değişken ve heterojen yapısı gerekse yapı sistemlerinin karmaşıklığı bu tahmin ve hesapların, ekonomik kıstasları da gözeterek, yeterli hassasiyette yapılmasını güçleştirmektedir. Bu bağlamda, incelenen proje alanlarındaki zemin profillerinde yer alan tabakaların davranış özelliklerinin laboratuvar ve arazi deneyleri ile elde edilmesi en geçerli yoldur (İyisan 1993). Ancak, söz konusu deneylerin uygulanması, süre-bütçe optimizasyonunun elde edilmesi açısından çoğu zaman olanaklı değildir. Geoteknik parametrelerin elde edilme hızının artırılması ve proje giderlerinin azaltılması amaçlanarak kabul edilebilir parametre tahmin süreçlerinin ortaya konulması, güncel literatür kaynaklarının araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Ancak bu durumda, tahmin süreçleri ile belirlenen parametrelerin tasarımlarda doğrudan kullanımının olası etkileri kanıtlanabilir nitelikte olmalıdır (Nuray vd. 2021). Günümüzde kullanılan gelişmiş bilgisayar teknolojileri yeni ve özgün malzeme parametre tahmin ve davranış modellerin ortaya çıkarılmasını ve istatistikî yöntemler ile bütünleştirilerek belirli metrikler ile kontrol edilmelerini sağlamıştır. Bu bakış açısı ile son yıllarda farklı alanlarda uygulanan (Pal 2003, Gislason et al. 2004, Waske et al. 2007, Akar vd. 2010) öğrenme tabanlı bir regresyon yöntemi olan Rastgele Orman yönteminin (RO), analizlerde yüksek doğruluk derecesi ve hızlı bir çözüm sağladığı vurgulanmaktadır. RO, çok sayıda değişken ve sınıfı, karmaşık modellemelere ve parametrelere ihtiyaç duymadan tahmin edebildiği için diğer yöntemlere kıyasla olumlu bir alternatif oluşturmaktadır (Watts and Lawrence 2008). RO yönteminin geoteknik mühendisliği disipliniinde uygulanabilirliği ise hali hazırda çok yeni bir araştırma konusudur. Pham vd. (2020) çalışmalarında, RO ve parçacık sürüsü optimizasyonunun yeni bir hibrit yumuşak hesaplama modelini geliştirilmiş, kil içeriği ile su

muhtevasını girdi ve zeminin drenajsız kesme dayanımını çıktı parametresi olarak kullanmıştır. Pham vd. (2020), serbest basınç dayanımını tahmin etmek için RO algoritmasının uygulama olasılığını araştırmışlardır. Bu amaçla, Vietnam'daki Long Phu enerji santrali projesi kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden elde edilen toplam 118 numune ve bunların deneylerini kullanmışlardır. Modelleme için kullandıkları veriler, girdi değişkenleri olarak kil içeriği, nem içeriği, özgül ağırlık, boşluk oranı, likit limiti ve plastik limiti içerirken, çıktı parametresi serbest basınç dayanımı olarak belirlenmiştir. Ly ve Pham (2021), destek vektör makinası, Gauss regresyon süreci ve RO şeklinde üç adet makine öğrenmesi yöntemi kullanarak Vietnam'daki Da Nang-Quang Ngai otoyolunda yapılan deneylerden faydalanarak oluşturdukları 145 verilik bir set kullanmışlardır. Analizlerinde girdi parametreleri olarak kil yüzdesi, su muhtevası, likit limit, plastik limit, özgül ağırlık ve boşluk oranı, çıktı parametresi olarak kohezyon değerini kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarını determinasyon katsayısı (R), ortalama mutlak hata (MAE) ve karesel ortalama hata (RMSE) metriklerini hesaplayarak kontrol etmişlerdir. Nuray vd. (2021) yüksek plastisiteli kil zeminlere ait literatürden toplanarak elde edilen 387 adet kıvam limiti ve 59 adet kompaksiyon-kıvam limiti deney çiftinin kullanılması ile oluşturulan bir veri seti kullanılarak plastisite indisinin ve kompaksiyon parametrelerinin RO yöntemi ile tahmin olasılığını araştırmışlardır. Zhang vd. (2021), Bayesian optimizasyonuna dayalı olarak yeni veri güdümlü aşırı gradyan artırma (XGBoost) ve RO yöntemlerini kullanarak, yumuşak hassas killi zeminlerin geoteknik özellikleri ile drenajsız kayma mukavemetleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Ön konsolidasyon basıncı, düşey efektif gerilme, kıvam limitleri ve doğal su muhtevası değerleri ile drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için genel bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Tüm bu çalışmaların sonuçları göz önüne alındığında RO yönteminin; hızlı sonuç veren, yüksek doğruluk sağlayan, sayısal tahminlerde iyi performans sergileyen ve öğrenmede avantaj sağlayan bir yöntem olduğu söylenebilmektedir. Bu bağlamda, bu makale kapsamında, RO yöntemi kullanılarak

geoteknik parametre tahmin süreci modellemesi yapılmıştır. Bu amaçla, düşük plastisiteli kil içerikli zeminlerin likit limit (w_L), plastik limit (w_P), doğal su muhtevası (w_n), doğal birim hacim ağırlık (γ_n), kuru birim hacim ağırlık (γ_k) değerlerinin kullanılması ile oluşturulan bir veri seti kullanılmıştır. Söz konusu veri seti kullanılarak oluşturulan tek ve çok değişkenli regresyon analizleri ile plastisite indisi (I_p) değerinin hesaplanmasında etkili olan faktörler incelenmiş ve plastisite indisi değerinin RO 'nun kullanımı ile doğrudan tahmin edilmesi olasılığı araştırılmıştır. I_p değeri matematiksel olarak w_L değeri ile w_P değerinin farkı ile hesaplanmakta olup malzeme davranışı açısından ise zeminin plastik davrandığı su muhtevası aralığı olarak tanımlanabilmektedir. Plastik davranış ise ince daneli zeminlerin sabit hacimde ve kırılma olmaksızın kalıcı deformasyona uğrama niteliğinin ölçüsüdür (Çinicioğlu vd. 2002). I_p değerine göre zeminler ilk olarak Atterberg tarafından sınıflandırılmış olup, bu sınıflandırma I_p 'nin zeminin türü, plastisite derecesi ve kohezivite derecesi arasındaki ilişki hakkında bilgi vermektedir (Prakash and Jain 2002). Aynı zamanda, I_p Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde (USCS) ince dane içerikli zeminlerin, sınıflarının belirlenmesinde w_L 'nin yanı sıra kullanılan ikinci parametredir. Dolayısı ile geoteknik mühendisliği yapılarının tasarımı sürecinde uygulanan arazi karakterizasyonu çalışmalarında, likit limit deneyinin uygulanması kaçınılmazdır. Aynı zamanda, I_p değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi özellikle ince dane içerikli zeminlerde malzeme davranışının değerlendirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. I_p değerinin, uygulanan likit ve plastik limit deneyleri ile belirlenmesi için faydalanılan standartlardan biri de ASTM D4318'dir. Bu makale kapsamında derlenen veri setinin elde edilmesi amacı ile de uygulanan tüm deneylerde bu standart kullanılmıştır. Ancak, ASTM D4318'de belirtildiği üzere bu standardın ürettiği sonucun kalitesi, onu uygulayan personelin yeterliliğine ve kullanılan ekipman ve tesislerin uygunluğuna bağlı olmaktadır. Likit limit deneyinin uygulanmasında Casagrande kabı kullanılmakta olup, kap-kam mekanizması ile değişen su içeriklerinde uygulanan darbe sayısı kaydedilerek w_L değeri hesaplanabilir. Plastik limit

deneyinin uygulanmasında ise elipsoidal boyutlu bir zemin kütesinin cam bir plaka üzerinde elle tekrarlı yuvarlanmasıyla deney gerçekleştirilir (Das 2010). Whyte (1982)'in plastik limit değerinin belirlenmesine dair yapmış olduğu çalışmalarda, zeminlerde tam doygunluk ve sıkışmazlık koşullarının geçerliliği kabul edilse dahi, zeminin akma gerilmesinin bazı deney uygulama koşullarının fonksiyonu olacağını ifade etmiştir. Bu koşullar; deney sırasında hazırlanmakta olan zemin numunesine uygulanan basınç; el-numune arasındaki temas düzleminin geometrisi; el-numune-cam düzlemi arasında sürtünme ve operatörün numuneyi yuvarlama hızı şeklindedir. Bu bağlamda, söz konusu faktörlerin etkisini minimize etmek ve deney uygulama süresini kısaltmak amacı ile plastik limit deneyi uygulanmadan I_p değerini, sadece w_L kullanımı ile veya farklı basit fiziksel deneylerin uygulanması ile tahmin etme süreci günümüz araştırmalarında sıklıkla rastlanan bir konu durumundadır (Naveena et al., 2018; Akbay Arama vd. 2021). Shimobe ve Spagnoli (2020), literatürden elde ettikleri 121 farklı ince daneli zeminin düşen koni ve Casagrande yöntemi ile belirlenen kıvam limit sonuçlarını kullanarak, doğal su muhtevası, koni penetrasyon indeksi ve plastisite indisi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Ermias ve Vishal (2020), ileri beslemeli üç katmanlı sinir ağı ile yaptıkları çok değişkenli regresyon analizlerinde aktivite, kıvam limitleri ve ince dane yüzdesi değerlerini kullanarak ince daneli zeminlerin şişme yüzdesini tahmin etmişlerdir. Kayabası (2020), ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkileri inceleyebilmek için Türkiye/Ankara şehrinden elde ettiği 440 adet ince daneli zemin kullanmıştır. Elde edilen zemin türlerinin şişme potansiyeli, şişme basıncı ve geoteknik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemiş, ayrıca şişme basıncını plastisite indeksi değerinden tahmin edebilmek için tekli regresyon analizleri yapmıştır. Ahmed vd. (2020), yüksek plastisiteli killi zeminlere uçucu kül ilavesinin geoteknik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla literatürden elde ettiği çeşitli laboratuvar test sonuçlarını kullanmıştır. Killi zeminlerin kıvam limitlerini, serbest basınç dayanımını ve sıkıştırma özelliklerini tahmin etmek için en uygun istatistiksel

modellerin geliştirilmesine odaklanmış, elde ettiği amprik ifadeleri literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmıştır. Söz konusu çalışmalarda kıvam limitleri ile ilgili tahminleme süreçleri yürütülmüştür ancak analizler dâhilinde RO yönteminin kullanımı söz konusu değildir. Bu nedenlerle, bu makalenin içeriğinde RO'nun I_p değerinin tahmininde uygulanabilirliği, farklı girdi parametreleri kullanılarak kurgulanan tek ve çok değişkenli analizler ile değerlendirilmiştir. Tek değişkenli analizlerde girdi parametresi w_L , çok değişkenli analizlerde girdi parametreleri ise iki set halindedir (1.set: w_L, w_n, γ_d ; 2.set: $w_L, w_n, \gamma_k, \gamma_d$).

2. Malzeme ve Yöntem

Çalışma kapsamında analiz yöntemi olarak kullanılan RO, karar ağacı tabanlı bir regresyon aracıdır (Breiman 2001). RO yöntemi için matematiksel formülasyonun ayrıntılı bir açıklaması Breiman (2001a) ve Liaw ve Wiener (2002)'de bulunabilmektedir. RO, tüm değişkenler arasından en iyi dalı kullanarak her bir düğümü dallara ayırmak yerine, her bir düğümde rastgele olarak seçilen değişkenler arasından en iyisini kullanıp her bir düğümü dallara ayırır (Akar ve Güngör 2012). Her bir veri seti orijinal veri setinden yer değiştirmeli olarak üretilir ve rastgele özellik kullanılarak ağaçlar geliştirilir (Archer 2008, Breiman 2001). Hızlı bir şekilde ve istenilen sayıda regresyon ağacı geliştiren ve çalıştıran RO, bir bağımlı değişken için tahmin yapabilmek adına, girdi verisini arka planda çalışan ormandaki her karar ağacına yerleştirir. Her bir veri seti orijinal veri setinden yeniden örnekleme kullanılarak üretilir. Sonuç olarak RO regresyonu, birden fazla karar ağacına sahip olur ve daha kararlı bir tahmin elde etmek için onları birleştirir (Ouedraogo et al. 2019). Algoritmanın herhangi bir denklem veya iki boyuttan fazla düşünüldüğünde bir düzlem oluşturamaması bu yöntemin literatürde belirtilen ispatlanan en belirgin eksikliğidir. Herhangi bir denklem üretilmediği için bilgisayar haricinde kullanımı mümkün kılınmazken, bu regresyon herhangi bir bilgisayar programına entegre edildiğinde başarılı sonuçlar vererek kullanılabilir (Segal, 2003). RO regresyonu algoritması, verilerin tamamını kullanmak yerine her analizde veri seti içinden seçtiği rastgele veri

gruplarını kullanır. Rastgele alınan veriler sebebi ile algoritma, her analizde, birbirileri ile çok yakın fakat değişik determinasyon katsayıları (R^2) hesaplar. Program, tanımladığı rastgele kesitlerin her biri için karar ağaçları inşa eder ve regresyona bir bağımsız değişken değeri girildiğinde karşılığı olan bağımlı veriyi tahmin edebilmek için bu karar ağaçlarının her birinde girdiyi ait olduğu bölüme yerleştirerek oluşturduğu karar ağaçlarındaki sonuçların ortalamasını alır. Bu regresyon türünde başlangıç olarak kullanılacak olan karar ağacı sayısı genellikle veri sayısının karekökü ile yarısı arasındaki sayılar aralığında seçilir, analizler gerçekleştirilebilir. Analiz sonuçlarının alınacağı ağaç sayısı, belirleme katsayısı (R^2)'nin maksimum olduğu karar ağacı sayısı olarak seçilir. Bununla birlikte, diğer regresyon teknikleriyle karşılaştırılabilecek değişken önem ölçülerinin (metriklerin) hesaplanmasına da olanak sağlamaktadır (Grömping 2009). Bu çalışma kapsamında RO regresyon yöntemi Phyton programı ile kullanılarak, oluşturulan veri seti analizleri gerçekleştirilmiştir. Python, yorumlayıcıları kullanan ve çok geniş bir uygulama alanında tercih edilen üst düzey, dinamik, nesne yönelimli, genel amaçlı bir programlama dilidir. Kolay anlaşılırdır ve kullanımı kolay olacak şekilde tasarlanmıştır. Yeni başlayanlar için uygun bir dil olmasıyla popülerlik kazanmış ve bugüne kadar en popüler giriş dili olarak kullanılan Java'nın yerini almıştır. Dinamik olarak yazılan bir dil olması sebebi ile Python çok esnektir. Bu dil, yapısal ve nesne yönelimli dâhil olmak üzere farklı programlama tekniklerini destekleyebilir (Srinath, 2017; Yogatama and Tirta, 2021). Phyton programında RO regresyon algoritmasının uygulanması ile analiz edilen veriler, algoritmaya girmeden önce ön hazırlık işlemlerinden geçirilebilmektedir. Bu işlemler, aykırı verilerin temizlenmesi, eksik verilerin doldurulması, eğitim ve test için verilerin ayrılması gibi amaçlar doğrultusunda sürdürülmektedir. Bu çalışmanın içeriğinde yapılan tahminlemelerde amaç gerçek veriye yakınlık olduğu için eksik veriler yerine herhangi bir tahminleme (doldurma) işlemi yapılmamıştır. Eğitim ve test verilerinin ayrılma işlemleri bir makine öğrenmesi kütüphanesi olan Sklearn kütüphanesindeki `train_test_split` modülü ile yapılmıştır. Bu modül girdi ve çıktı verilerinin

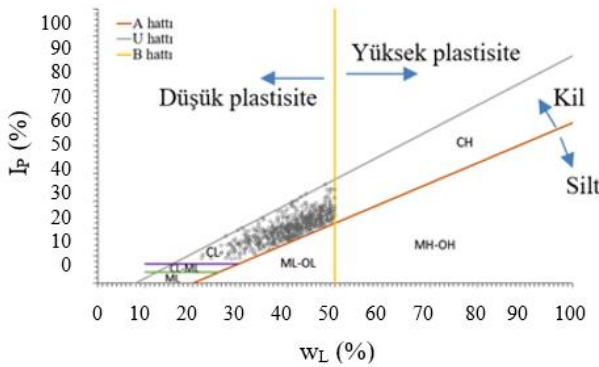
tamamını değerlendirmekte ve istenilen bir oranda verileri eğitim ve test için bölmektedir. Modül parametrelerinden olan shuffle parametresi (shuffle=True olarak kullanılır) ile veriler karıştırılarak bölme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca belli bir yerden bölme sağlayan random_state parametresi (random_state=x (x herhangi bir sayı) olarak kullanılır) kullanılmamıştır çünkü belli bir yerden ayrılan veriler için iyi bir temsil yapıp yapılamadığı belli olamamıştır. O yüzden test sonucu en uygun model ve buna bağlı olarak bölünmüş veri seti esas alınarak analizler uygulanmıştır. Analizlerin sonuçları, uluslararası metrikler olarak kullanılan R (korelasyon katsayısı), R^2 (determinasyon katsayısı), MAE (ortalama mutlak hata), MSE (en küçük ortalama kare hatası), RMSE (karesel ortalama hata), MAPE (ortalama mutlak hata yüzdesi) ve SSE (kare hataları toplamı) değerleri kullanılarak yorumlanmıştır. Kullanılan korelasyonlar ilişkinin güvenilirliğini ölçmektedirler (verinin buna uygunluğunun iyiliği). Diğer bir deyişle, bir değişkenin diğerini ne kadar iyi tahmin edebileceğinin bir ölçüsü niteliğindedirler (verinin bağlamı göz önüne alındığında) ve bir ilişkinin kesinliğini belirlerler. Bu bağlamda, korelasyon katsayısı, R, bir sayının diğerindeki değişikliklerden ne kadar etkilenmesinin beklenebileceğinin matematiksel bir ölçüsüdür. Doğrusal R bazen geliştiricisi Karl Pearson'ın onuruna Pearson ürün moment korelasyon katsayısı olarak adlandırılır. İki değişken X ve Y arasındaki doğrusal ilişkinin derecesinin kesin sayısal değerini verir. Sıfır R, iki sayının ilişkili olmadığı anlamına gelir. Sıfır olmayan R, sayıların ilişkili olduğu anlamına gelir, ancak katsayı 1 veya -1 olmadığı sürece başka etkiler vardır ve iki sayı arasındaki ilişki sabit değildir. R sıfıra ne kadar yakınsa belirsizlik o kadar büyük olur ve düşük korelasyon katsayıları, ilişkinin yararlı olacak kadar kesin olmadığı anlamına gelir. $R=1$, iki sayının mükemmel bir şekilde ilişkili olduğu anlamına gelir: biri büyürse diğeri de büyür ve birindeki değişiklik diğerindeki değişikliğin katıdır. $R= -1$, sayıların mükemmel şekilde ters orantılı olduğu anlamına gelir. Birindeki büyüme, diğerindeki büyümenin negatif bir katıdır (Kandpal and Kandpal, 2014). Aynı zamanda R değerinin karesi olarak da adlandırılan determinasyon katsayısı, R^2 , bir regresyon

uyumunun iyiliği olarak yorumlanır. R^2 ne kadar yüksek olursa, bağımlı değişkenin bağımsız değişken tarafından açıklandığı varyans o kadar iyi olur. R^2 , bir regresyonun kullanılabilirliğinin genel ölçüsüdür ve açıklanan varyasyonun toplam varyasyona oranıdır. R^2 , bir değişkenin varyansının (dalgalanmanın) diğer değişkenden tahmin edilebilirlik oranını verdiği için yararlıdır ve $0 < R^2 < 1$ olacak şekildedir. Sonuç olarak R^2 , en uygun çizgiye en yakın olan verilerin yüzdesini temsil eder. Davis (1971) ve Lewis (1982), R^2 değerine bağlı olarak korelasyon gücünün alt ve üst sınırlarını tanımlamışlardır. R^2 değerinin 0.01-0.09 aralığında korelasyon gücünün çok zayıf, R^2 değerinin 0.10-0.29 aralığında korelasyon gücünün zayıf, R^2 değerinin 0.3-0.49 aralığında korelasyon gücünün orta, R^2 değerinin 0.50-0.69 aralığında korelasyon gücünün güçlü, R^2 değerinin 0.70-1.00 aralığında korelasyon gücünün çok güçlü olarak tanımlanabileceğini belirtmişlerdir. En küçük ortalama kare hatası, MSE, bir regresyon eğrisinin bir diziye ne ölçüde yakın olduğunu göstermektedir. MSE, bir makine öğrenmesi modelinin performansını ölçmekte olan bir metriktir ve daima pozitif ve MSE değeri düşük veya sıfıra yakın olan tahminleyicilerin daha iyi bir performans sergilediği söylenebilmektedir (Veri bilimcisi, 2021). Ortalama mutlak hata, MAE, yönlerini dikkate almadan bir dizi tahmindeki hataların ortalama büyüklüğünü ölçer. Tüm bireysel farklılıkların eşit ağırlığa sahip olduğu tahmin ve gerçek gözlem arasındaki mutlak farkların deney numunesi üzerindeki ortalamasıdır. MAE, 0'dan ∞ 'a kadar değişebilen niteliktedir ve düşük veya negatif yönelimli değerlerde modeller daha iyi performans gösterirler. Karesel ortalama hata, RMSE, hatanın ortalama büyüklüğünü de ölçen ikinci dereceden bir puanlama kuralı olarak tanımlanabilir ve tahmin ile gerçek gözlem arasındaki kare farklarının ortalamasının karekökü olarak hesaplanabilir (Medium, 2021; Veri bilimcisi, 2021). RMSE, 0'dan ∞ 'a kadar değişebilir niteliktedir ve düşük veya negatif yönelimli değerlerin daha iyi performans gösterdiği söylenebilmektedir. RMSE=0 modelde hiç hata olmadığı anlamına gelmektedir. Ortalama mutlak hata yüzdesi, MAPE, tahminlerin mutlak yüzdeler hata oranının ortalamasıdır. Hata, gerçek veya gözlemlenen değer eksi tahmin edilen değer olarak tanımlanır. Yüzde hataları, MAPE'yi

hesaplamak için işarete bakılmaksızın toplanır. Ayrıca mutlak yüzde hataları kullanıldığından pozitif ve negatif hataların birbirini yok etmesi sorunu da ortadan kalkar. MAPE ne kadar küçükse tahmin o kadar iyidir (Swamidass, 2000). Kare hataları toplamı, SSE, gözlemlenen değer ile tahmin edilen değer arasındaki farktır. Veri ile doğrusal regresyon gibi bir tahmin modeli arasındaki tutarsızlığın ölçüsüdür. Hata ne kadar küçük olursa, regresyonun tahmin gücü o kadar iyi olur.

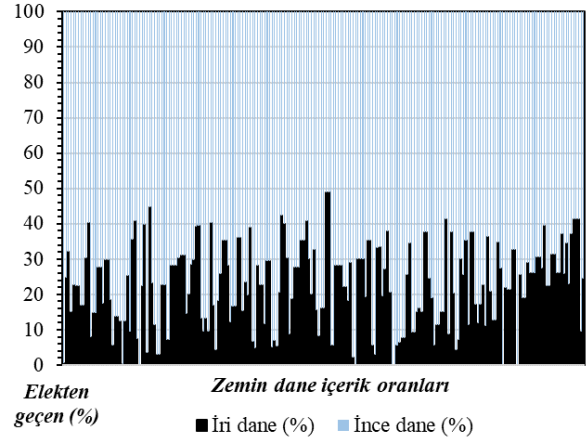
3. Verilerin Sınıflandırılması

Bu çalışma kapsamında, USCS'ye göre düşük ve orta plastisiteli inorganik killer, kumlu, çakıllı ve siltli killer olarak ifade edilen CL grubu zeminler için ASTM D4318'e göre uygulanan kıvam limiti, ASTM D422'ye göre uygulanan elek analizleri, TS 1900-1'e göre uygulanan doğal birim hacim ağırlık deneyleri dikkate alınmıştır (Şekil 1). Bu bağlamda, ağırlıklı olarak İstanbul İli Avrupa yakasının güneybatısında uygulanan zemin etüt raporlarının sayısallaştırılması ile derlenen 665 adet kıvam limitleri-elek analizi; 272 adet kıvam limitleri-doğal su muhtevası-doğal birim hacim ağırlık-elek analizi, 116 adet ise kıvam limitleri-doğal su muhtevası-doğal birim hacim ağırlık-kuru birim hacim ağırlık ve elek analizi deneylerini içeren 3 farklı set veri düzenlenmiştir.



Şekil 1. Makale kapsamında kullanılan zeminlerin Casagrande plastisite kartında gösterimi. Her bir sette uygulanan deney türüne göre setlerdeki veri sayısı değişmektedir. Söz konusu verilerde, zeminlere ait likit limit değerleri 50'den küçük olması sınıflandırmada en temel ayırıcı özelliktir. Ayrıca plastisite grafiğine yerleştirilen verilerin A hattının üstü ve U hattının altında tanımlanan aralıkta kalması, zeminlerin içeriğinde, davranışta etkili olacak seviyede kil içeriği olduğunu

göstermektedir. Bu durum, değerlendirmeye alınan zeminlerin ince ve iri dane oranlarını belirten Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Makale kapsamında kullanılan zeminlerin dane içerik oranları

Çalışma kapsamında kullanılan veriler, birinci yazar adına düzenlenmiş özel izin belgesi ile İstanbul Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı'ndan temin edilmiştir. İlgili veriler, kopyalama-sayısallaştırma-tasnif etme gibi sıralı adımlar ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. İlgili deneyler, İstanbul'da bulunan kamu binalarının temellerinin veya iksa sistemlerinin veya temel-yapı güçlendirme sistemlerinin veya dayanma yapılarının tasarımında kullanılan deneylerdir. Aynı zamanda, söz konusu deneylerin uygulanışı birinci yazar tarafından kontrol edilebilmiştir. Bu sebepler ile deneylerin hangi standartlar dâhilinde ve çevresel koşullar altında uygulandığı yazarlar tarafından bilinmektedir. Ancak bu durum, deneylerin uygulanmasında farklı operatörlerin yer aldığı gerçeğini değiştirememektedir. Dolayısı ile Whyte (1982)'in öngördüğü, malzeme plastik davranışını etkileyen faktörlerin ortadan kaldırılabilmesi amacı göz önünde tutularak I_p değerinin RO yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi sürecine başvurulmuştur.

4. Analiz ve Değerlendirmeler

Makalede öngörülen analizler, tek değişkenli ve çok değişkenli olmak üzere alt gruplara ayrılmıştır. Tek değişkenli analizlerde I_p değerinin, sadece w_L 'nin fonksiyonu olduğu varsayılarak tahminleme süreci yürütülmüştür. Başka bir deyişle, girdi parametresi olarak sadece w_L , çıktı parametresi olarak I_p göz

önüne alınmıştır. Analizlerde kullanılan setteki deney grubu sayısı 665 (665 adet likit limit, 665 adet plastik limit deneyi uygulanmıştır) adettir. Tek değişkenli analizler kapsamında RO algoritmasının uygulanmasının yanı sıra ayrıca doğrusal, logaritmik, polinom, üssel regresyon uygulamaları da yapılmıştır. Ancak, makale kapsamına sadece en tatminkâr metrik değerlerini veren doğrusal regresyon uygulamaları dâhil edilmiştir. Çok değişkenli analizlerde ise iki farklı veri seti kullanılmış ve RO analizleri her iki set için ayrı ayrı uygulanmıştır. Söz konusu veri setlerinden birincisinde toplam deney grubu sayısı 272 adet olup analizlerde girdi parametresi olarak w_L , w_n , γ_n , γ_k çıktı parametresi olarak I_p değerlendirilmiştir. İkinci veri setindeki toplam deney grubu sayısı 116 adet olup analizlerde girdi parametresi olarak w_L , w_n , γ_n , γ_k çıktı parametresi olarak I_p değerlendirilmiştir.

4.1 Tek değişkenli analizler

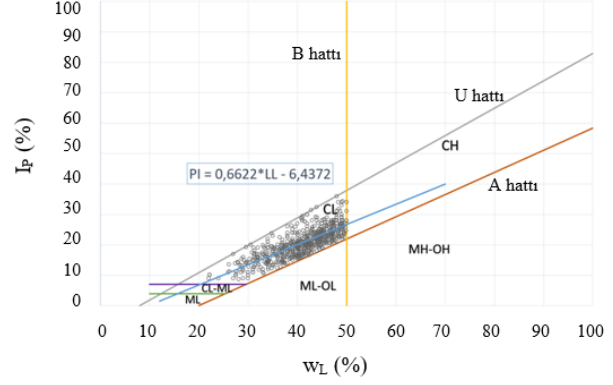
4.1.1 Doğrusal Regresyon uygulaması

Doğrusal regresyon analizlerinde w_L değerleri bağımsız değişken, I_p değerleri ise bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan w_L değerlerinin üst sınırı %50 alt sınırı ise %22 olarak belirlenmiştir. Regresyon sonucunda I_p ile w_L arasında elde edilen ilişki Eşitlik (1)'de verilmiştir (Şekil 3).

$$I_p = 0.6622W_L - 6.4372 \quad (1)$$

Veri dağılımları göz önüne alındığında; verilerin belirli bölgede kümelenmesine rağmen parametrelerin arasında doğrusal bir ilişki sağlanabildiği görülmektedir. Bu ilişkiyi ifade eden en uygun denklemin R değeri 0.804, R^2 değeri 0.647, SSE değeri 5371, MSE değeri 8.07, RMSE değeri 2.84, MAPE değeri 11.24 ve MAE değeri 2.21 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen R^2 değerinin Davis (1971) ve Lewis (1982) önerisine göre değerlendirilmesi durumunda elde edilen eşitliğin ($R^2= 0.50-0.69$ aralığında) güçlü bir korelasyon olduğu söylenebilmektedir. Ancak diğer metrik değerler de göz önüne alındığında (R ve R^2 dışında), veriler arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenmesine rağmen, tatminkâr sonuçlar elde edilemediği görülmektedir. Söz konusu metriklerde hedef,

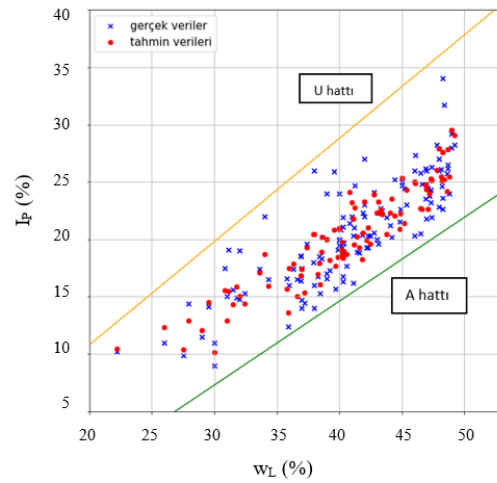
düşük değerler hesaplanması ile daha iyi performans elde edilmesidir. Ancak özellikle SSE değerinin çok büyük olması korelasyon tahmin gücünün düşük olduğu kanısını ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3. Doğrusal regresyon uygulanması ile elde edilen I_p - w_L ilişkisi

4.1.2 RO Regresyonu uygulaması (w_L : Bağımsız değişken, I_p : Bağımlı değişken)

RO regresyon analizlerinde de w_L değerleri bağımsız değişken, I_p değerleri ise bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan w_L değerlerinin üst sınırı %49.2 alt sınırı ise %22.2 olarak belirlenmiştir. Analizler için oluşturulan toplamda 665 deney grubundan oluşan veri setinin %80 oranındaki kısmı, RO algoritmasını eğitmek için, %20 oranındaki kısmı ise algoritmayı test etmek için kullanılmıştır. Şekil 4'te test aşamasında kullanılan verilerin tahmin değerleri ile gerçek değerleri karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.



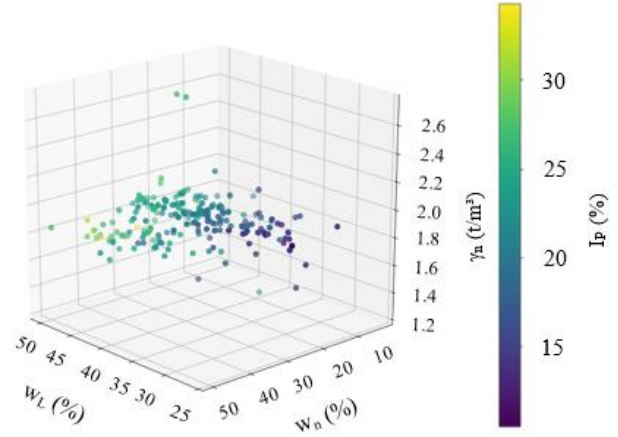
Şekil 4. RO regresyon uygulanması ile elde edilen I_p - w_L ilişkisi

Analizlerin sonucunda, R değeri 0.865, R^2 değeri 0.749, SSE değeri 709, MSE değeri 5.33, RMSE değeri 2.3, MAPE değeri 8.83 ve MAE değeri 1.78 olarak elde edilmiştir. Elde edilen R^2 değerinin Davis (1971) ve Lewis (1982) önerisine göre değerlendirilmesi durumunda elde edilen eşitliğin ($R^2= 0.70-1.0$ aralığında) çok güçlü bir korelasyon olduğu söylenebilmektedir. Ancak bu ölçüt RO algoritması uygulamalarının doğrusal regresyon analizi uygulamalarına göre performansının değerlendirilmesi için yeterli değildir. Analiz sonucunda hesaplanan diğer metriklerin doğrusal regresyon sonucunda elde edilen metrikler ile karşılaştırılması, uygulanabilirliğin denetlenmesi açısından tatminkâr sonuçlar verebilmektedir. Bu bağlamda, RO analizleri ile elde edilen metrik değerlerinde, doğrusal regresyon analizlerinde elde edilen metrik değerlerine oranla belirgin bir düşme gerçekleştiği aşikârdır. Bu durum RO yönteminin uygulanmasının doğrusal regresyon analizlerine göre daha iyi performans sonuçları vereceğinin göstergesidir. Aynı zamanda doğrusal regresyon analizlerinde RO regresyon analizlerine göre daha fazla sayıda veri ile eğitim yapılmış olması ve doğası gereği test sonuçları eğitimin yapıldığı veri ile alınmış olmasına rağmen, RO regresyonunda daha iyi performans elde edilmesi dikkat çekicidir. Ayrıca, SSE değeri doğrusal regresyonda 665 veri, RO regresyonunda ise 133 veri test edilerek hesap edildiği için, bu değer iki regresyonun karşılaştırılmasında kullanılması uygun değildir.

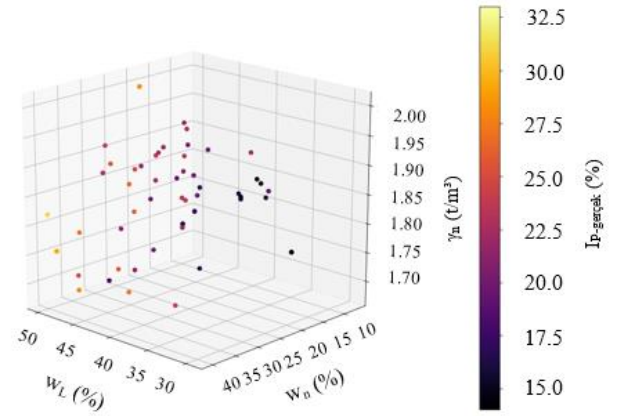
4.3 Çok değişkenli analizler

4.3.1 RO Regresyonu uygulaması (1. Veri seti)

RO regresyon analizlerinde de w_L , w_n , γ_n değerleri bağımsız değişken, I_p değerleri ise bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan w_L değerlerinin üst sınırı %49.2 alt sınırı ise %27.6 olarak belirlenmiştir. Analizler için oluşturulan toplamda 272 deney grubundan oluşan veri setinin %80 oranındaki kısmı, RO algoritmasını eğitmek için, %20 oranındaki kısmı ise algoritmayı test etmek için kullanılmıştır. Şekil 5'te, analizlerde kullanılan 1. veri setine ait parametreler ve değerleri sunulmuştur. Şekil 6'da ise 1. veri seti kullanılarak uygulanan çok değişkenli RO regresyonu analizinde kullanılan test kümesi ve veri dağılımları sunulmuştur.

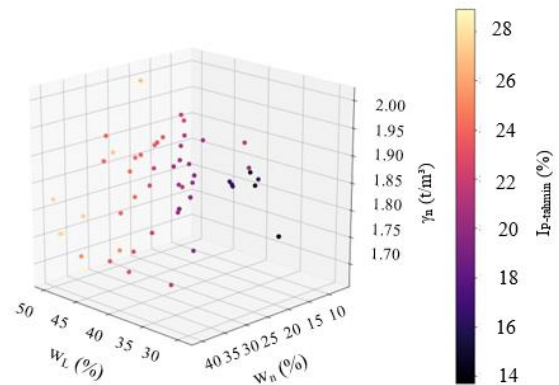


Şekil 5. Çok değişkenli RO regresyonu uygulamasında 1. veri seti



Şekil 6. Çok değişkenli RO regresyonu uygulamasında 1. veri seti: test verileri

Söz konusu test verileri ile uygulanan analiz sonucunda elde edilen tahmin değerleri ise Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Çok değişkenli RO regresyonu uygulamasında 1. veri seti: tahmin verileri

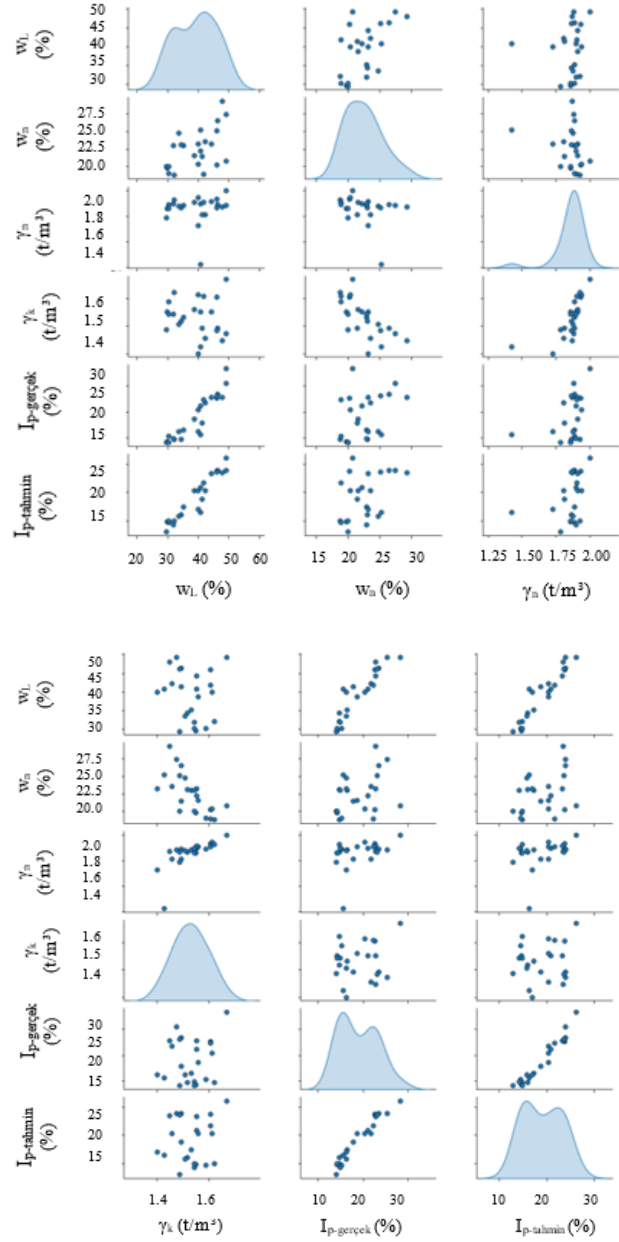
Çok değişkenli RO regresyonu analizinin 1. veri seti için uygulanması sonucunda R değeri 0.964, R^2 değeri 0.93, SSE değeri 93.15, MSE değeri 1.7, RMSE

değeri 1.3 MAPE değeri 4.96 ve MAE değeri 0.95 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen R^2 değerinin Davis (1971) ve Lewis (1982) önerisine göre değerlendirilmesi durumunda elde edilen eşitliğin ($R^2= 0.70-1.0$ aralığında) çok güçlü bir korelasyon olduğu söylenebilmektedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre elde edilen metrik değerler, RO algoritmasının I_p tahmininde başarılı bir performans sunduğunu göstermektedir. 1. setteki verilerin dağılımı değerlendirildiğinde, dağınık bir yapıya sahip olduğu söylenebilmektedir. RO yöntemi uygulamasının iyi bir performans sunması, kullanılan veri setinin bu şekildeki dağılımı ile ilişkilendirilebilir niteliktedir. Çünkü dağınık veri setleri ile herhangi bir eğri veya düzlem oluşturulması mümkün olmadığından, RO regresyonu dağınık veri setlerinde daha iyi çalışmakta ve çok daha iyi doğruluk değerleri vermektedir. Bu durum, literatürdeki diğer çoğu yöntemin uygulanması açısından tercih edilmeyen bir durum olmasına rağmen, RO algoritmasının avantajlı ve dikkat çeken bir özelliğini oluşturmaktadır. Tahmin performansındaki artışın diğer bir sebebi olarak, analiz girdi parametrelerinin değişmesi öne sürülebilmektedir. Çok değişkenli analizler kapsamında, değişkenlere yeni eklenen γ_n parametresinin veri setindeki tahmin performansını olumlu etkilediği söylenebilmektedir. RO regresyonunun bir diğer özelliği olan fazla parametre ile daha iyi çalışabilme özelliği de bu durumu destekler niteliktedir.

4.3.2 RO Regresyonu uygulaması (2. Veri seti)

RO regresyon analizlerinde w_L , w_n , γ_n , γ_k değerleri bağımsız değişken, I_p değerleri ise bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan w_L değerlerinin üst sınırı %49.2 alt sınırı ise %29.5 olarak belirlenmiştir. Analizler için oluşturulan toplamda 116 deney grubundan oluşan veri setinin %80 oranındaki kısmı, RO algoritmasını eğitmek için, %20 oranındaki kısmı ise algoritmayı test etmek için kullanılmıştır. 2. veri seti için uygulanan çok değişkenli RO regresyonu sonucunda elde edilen I_p tahmin değerleri ve diğer tüm parametreler Şekil 8'deki determinasyon matrisi ile görselleştirilmiştir. Determinasyon matrisinin köşegenindeki dağılımlar, değişkenlerin ağırlığının hangi değerlerde ve ne

kadar olduğunu görebilmek amacı ile eklenmiştir. Ayrıca, bu matristen her bir değişkenin kendi aralarındaki ilişkisi de gözlemlenebilmektedir.



Şekil 8. Çok değişkenli RO regresyonunun 2. Veri setindeki uygulamasında çıktı ile girdi değişkenleri arasındaki korelasyon analizi

2. veri seti için uygulanan çok değişkenli RO regresyonunda R değeri 0.969, R^2 değeri 0.94, SSE değeri 21.51, MSE değeri 0.89, RMSE değeri 0.94 MAPE değeri 4.32 ve MAE değeri 0.81 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu metrik ölçüm değerleri, analizlere eklenen γ_k parametresinin de algoritma performansını arttırdığı söylenebilmektedir. Ayrıca elde edilen R^2 değerinin Davis (1971) ve Lewis (1982) önerisine göre

değerlendirilmesi durumunda elde edilen eşitliğin ($R^2= 0.70-1.0$ aralığında) çok güçlü bir korelasyon olduğu söylenebilmektedir. Diğer metrik değerlerin sıfıra yaklaşması ise korelasyonun R^2 değeri ile orantılı bir şekilde, iyi bir tahmin performansı sunduğunun göstergesidir. Şekil 8' de tanımlanan ve modele girdi olarak verilen parametrelerin genel dağılım özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Girdi parametrelerinin genel dağılım özellikleri

Parametre	Maximum	Minimum	Ortalama	Medyan	Standart sapma
w_L (%)	49.2	29.5	40.35	40.35	6.46
w_n (%)	29.3	18.8	22.6	22.6	2.75
γ_n (t/m ³)	2.000	1.425	1.860	1.883	0.11
γ_k (t/m ³)	1.669	1.400	1.540	1.537	0.07
I_p -gerçek (%)	28.2	14.1	19.06	18.25	4.07
I_p -tahmin (%)	26.195	12.99	19.17	19.557	3.88

Çizelge 1'e göre girdi parametresi olarak tanımlanan tüm değişkenlerde, kendi içlerinde medyan ve ortalama değerlerinin çok yakın olduğu ve normal bir dağılımla ifade edilebileceği görülmektedir. Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi tahmin edilen ve gerçek I_p - w_L dağılımları birbirine çokça benzerlik göstermektedir ve bu durum modelin performansı açısından olumlu bir göstergedir. Ayrıca, w_n ve γ_k gibi çok değişkenli regresyon analizi girdileri ile gerçek ve tahmin edilen I_p değerleri arasında standart fonksiyonlar ile (doğrusal, polinom, üssel, logaritmik vb.) açıklanabilecek bir ilişki görülmemektedir. Bu durum, dağınık veri setlerinin ilişkilendirilmesinde ve yüksek performanslı bir tahmin modeli elde edilmesinde RO regresyon metodunun avantajını bir kez daha vurgulamaktadır.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında RO regresyon yönteminin düşük plastisiteli killi zeminlerin (CL) plastisite indisinin tahminindeki etkinliği sunulan tek ve çok değişkenli analizler ile incelenmiştir. Tahminleme sürecinde kullanılmak üzere belirlenen zeminlere ait

veriler, İstanbul Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon Müdürlüğü'nden temin edilmiş ve ağırlıklı olarak İstanbul İli Avrupa yakasının güneybatısında uygulanan zemin etüt raporları değerlendirmeye alınmıştır. İlgili veri seti kullanılarak, tek değişkenli doğrusal regresyon analizi, tek değişkenli RO yöntemi analizi, 1. veri setinin kullanımı ile çok değişkenli RO yöntemi analizi, 2. veri setinin kullanımı ile çok değişkenli RO yöntemi analizi olmak üzere 4 temel analiz uygulanmıştır. Bu bağlamda, makale kapsamında uygulanan analizlerin sonucunda elde edilen metriklerin değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Analizler sonucunda elde edilen metrikler

Metrik	Tek değişkenli analiz		Çok değişkenli analiz	
	DR*	RO	RO (1.veri seti)	RO (2. veri seti)
R	0.804	0.865	0.964	0.969
R^2	0.647	0.749	0.930	0.940
SSE	5371	709	93.150	21.510
MSE	8.070	5.330	1.700	0.890
RMSE	2.840	2.300	1.300	0.940
MAPE	11.240	8.830	4.960	4.320
SSE	2.210	1.780	0.950	0.810

*Doğrusal regresyon analizi

Elde edilen metrik değerlerin karşılaştırılması ve geoteknik mühendisliği bakış açısı ile yorumlanması sonucunda elde edilen değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. I_p değerlerinin yalnızca w_L değerlerinin kullanımı ile tahminini amaçlayan literatür çalışmalarından Seed vd. (1964), Laskar ve Pal (2012), Sen ve Pal (2014), Spagnoli vd. (2018), Sharma ve Sridharan (2018) kullanmış oldukları farklı yöntemler ile I_p - w_L ilişkisini doğrusal bir şekilde elde etmişlerdir. Ancak söz konusu ilişkilerin, göz önüne alınan tüm kil içerikli zeminler için tatminkâr sonuçlar ortaya koyamadığı Akbay Arama vd. (2021) tarafından yapılan karşılaştırmalar ile tartışılmıştır. Bu bakış açısından yola çıkılarak, bu çalışma kapsamında da, kullanılan özel bir veri setinden ve kil içerikli bir zemin grubundan faydalanılarak, doğrusal bir ilişki kullanımı

- ile I_p - w_L davranışını yorumlamanın yeterliliği sorgulanmıştır.
2. Metrik değerler bir bütün olarak göz önüne alındığında tek değişkenli RO yöntemi uygulamalarının doğrusal regresyon analizlerinden daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Ancak söz konusu metriklerden özellikle SSE değerinin büyüklüğü, her iki yöntemde de, korelasyon tahmin gücünün yetersizliği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.
 3. Çok değişkenli analizlerdeki bağımsız değişken parametrelerin artırılması durumunda RO regresyonunun vereceği tepkinin, analiz doğruluğunu hangi yönde etkilediği incelenmiştir. Çok değişkenli analiz uygulamasının RO yönteminin performansını daha da arttığı söylenebilmektedir. I_p değerinin tahmininde analizlere girdi olarak dâhil edilen w_n , γ_n , ve sonrasında γ_k parametrelerinin RO regresyonu performansını arttığı metrik değerlerde gözlenen iyileşme ile belirlenebilmektedir. Bu durumun en önemli nedeni olarak, RO regresyonu yönteminin kolektif bir makine öğrenmesi algoritması olması düşünülebilir. RO regresyonu, sayısının kullanıcı tarafından belirlenebileceği karar ağaçlarının tahmin ettiği değerleri toparlayıp ortalamasını almakta ve bu şekilde doğruluğu yüksek olan çıktılar sağlamaktadır. Ayrıca, RO regresyonu, sıklıkla kullanılan diğer analiz yöntemlerindeki gibi herhangi bir doğrusal, polinom, üssel, logaritmik vb. fonksiyonlara bağlı çalışmamaktadır. Bu tür çözümler, denklemin verdiği çıktılar ile sınırlı kalmaktayken, RO regresyonu yöntemi ise diğer yöntemlerle çözümlenemeyen aykırı ve/veya dağınık verilerin tahminine ve/veya çözümüne ulaşabilmektedir.
 4. Çalışma kapsamında kullanılan dağınık veri setlerinde (2. veri seti), standart kullanımdaki analiz yöntemlerine göre daha başarılı performans elde edilmiştir.

5. Literatürde parametre tahmin süreci ile ilişkili çalışmaların birçoğundan farklı olarak bu çalışmada, çok değişkenli analizlerin daha tatminkâr performanslar sunduğu görülmüştür. Çok değişkenli analizlerde kullanılan ilave parametreler likit limit deney sürecinde kolaylıkla belirlenebilen ve hesaplanabilen (w_n , γ_n , γ_k), ilave bir deney süreci veya süresi gerektirmeyen deneyler veya hesaplamalardır. Bu doğrultuda, daha fazla geoteknik parametre tanımı ile şekillendirilen RO regresyonu analizleri, uygulamalarda da kullanılabilir ve hızlı bir çözümleme süreci sunmaktadır.
6. Sonuçlarda sunulan bu değerlendirmelerin, çalışma kapsamında kullanılan veri seti için geçerli olduğu ve farklı veri setleri ile RO metodu uygulamalarının analiz sonucunda elde edilecek metrik değerler doğrultusunda yorumlanması gerektiği unutulmamalıdır.
7. Bu çalışma farklı araştırmaların yürütülmesinde, sağladığı bakış açısı ile faydalı olabilecek ve kullanılan veri açısından tatminkâr bir sayı sunarak yeni çalışmaların önünü açabilecek niteliktedir. Bu doğrultuda, yapay sinir ağları veya derin öğrenme teknikleri gibi daha ileri düzey bilgisayar teknolojileri kullanılarak, ilgili tekniklerin geoteknik tasarımda kullanılabilirlikleri sorgulanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen verilerin erişimine sağlamış oldukları katkıdan dolayı İstanbul Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon Müdürlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

5. Kaynaklar

- Ahmed, Z., Mohamed, K., Zeeshan, S., Dong, X., 2020. Artificial intelligence with multi-functional machine learning platform development for better healthcare and precision medicine. *Database*, **2020**, 1-35.
- Akar, Ö., Güngör, O., Akar, A., 2010. Rastgele Orman Sınıflandırıcısı ile arazi kullanım alanlarının belirlenmesi. *III. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, Gebze, Kocaeli*, **1**, 142-152.

- Akar, Ö., Güngör, O., 2012. Rastgele Orman Algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, **1**, 2, 139-146. DOI: 10.9733/jgg.241212.1t.
- Akbay Arama, Z., Yücel, M., Akın, M.S., Dalyan, İ., 2021. A comparative study on the application of artificial intelligence networks versus regression analysis for the prediction of clay plasticity. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 534.
- Archer, K.J., 2008. Empirical characterization of Random Forest variable importance measure, computational statistical data analysis. *Computational Statistics & Data Analysis*, **52**, 4, 2249-2260.
- ASTM D-4318. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- ASTM D-422. Standard test method for particle-size analysis of soils.
- Breiman, L., 2001. Random Forests, Machine Learning. *2001 Kluwer Academic Publishers*, **45**, 1, 5-32.
- Çinicioğlu, F., Öser, C., Uzman, E., Kutu, S., Güler, M., 2002. Killerde kıvam parametrelerinin birbirleriyle ilişkilendirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Eskişehir, Türkiye.
- Das, M. D., 2010. Principals of Foundation Engineering. SI Edition, 15-17.
- Davis, J.A. 1971. Elementary Survey Analysis. Prentice Hall, New Jersey.
- Ermias, B., Vishal, V., 2020. Application of artificial intelligence for prediction of swelling potential of clay-rich soils. *Geotech Geol Eng*, **38**, 6189–6205.
- Gislason, P.O., Benediktsson, J. A, Sveinsson, J.R., 2004. Random Forest Classification of multi-source remote sensing and geographic data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '04 Proceedings*, **2**, 1049 – 1052.
- Grömping, U., 2009. Variable importance assessment in regression: linear regression versus Random Forest. *Am Stat*, **63**, 4, 308–319. DOI:10.1198/tast.2009.08199.
- Iyisan, R., 1993. Geoteknik özelliklerin belirlenmesinde sismik ve penetrasyon deney sonuçlarının karşılaştırılması (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği, 255.
- Kandpal, M., Kandpal, A., 2014. Establishing correlation between size estimation metrics and effort-A statistical approach. *International Journal of Computer Applications*, **95**, 21, 1-6.
- Kayabası, A., 2020. Geotechnical properties of fine-grained soils in Ankara/Turkey: an assessment of the existing empirical equations. *Environ Earth Sci*, **79**, 282.
- Laskar, A., Pal, S. K., 2012. Geotechnical characteristics of two different soils and their mixture and relationships between parameters. *EJGE*, **17**, 2821–2832.
- Lewis, C. D., 1982. Industrial and business forecasting methods: a practical guide to exponential smoothing and curve fitting. Butterworths Scientific, London.
- Ly, H., Nguyen, T., Pham, B. T., 2021. Estimation of soil cohesion using machine learning method: A Random Forest approach. *Advances in Civil Engineering*, 8873993, 14. <https://doi.org/10.1155/2021/8873993>
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and regression by Random Forest. *R News*, **2**, 3, 18–22.
- Naveena, N., Sanjay, S. J., 2018. Establishing relationship between plasticity index and liquid limit by simple linear regression analysis. *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, **6**, 6, 1975–1978.
- Nuray, S. E., Gençdal, H. B., Akbay Arama, Z., 2021. Zeminlerin kıvam ve kompaksiyon özelliklerinin tahmininde Rastgele Orman Regresyonu yönteminin uygulanabilirliği. *Journal of Engineering Sciences and Design*, **9**, 1, 265-281. DOI: 10.21923/jesd.804446.
- Ouedraogo, I., Defourny, P., Vanclooster, M., 2019. Application of Random Forest Regression and comparison of its performance to multiple linear regression in modeling groundwater nitrate concentration at the African Continent scale. *Hydrogeology Journal*, **27**, 1081–1098. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1900-5>.

- Pal, M., 2003. Random Forest for land cover classification. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03 Proceedings*, **6**, 3510-3512.
- Pham, T.B., Qi, C., Ho, L.S., Thoi, T.N., Ansari, N.A., Nguyen, M.D., Nguyen, H.D., Ly, H.B., Le, H.V., Prakash, I., 2020. A novel hybrid soft computing model using Random Forest and particle swarm optimization for estimation of undrained shear strength of soil. *Sustainability*, **12**, 2218; DOI:10.3390/su12062218.
- Prakash, S., Jain, P.K., 2002. Engineering Soil Testing, Nem Chand & Bros, Roorkee.
- Seed, H. B., Woodward, R.J., Lundgren, R., 1964. Fundamental aspects of the atterberg limits. *J Soil Mech Found Div*, **90**, 6, 75–106.
- Segal, M.R. 2003. Machine Learning Benchmarks and Random Forest Regression. <https://escholarship.org/uc/item/35x3v9t4>.
- Sen, B., Pal, S. K., 2014. Index properties of soils collected from different locations and correlations of parameters. *EJGE*, **19**, 3443–3452.
- Sharma, B., Sridharan, A., 2018. Liquid and plastic limits of clays by cone method. *Geo-Engineering*, **9**, 22–31.
- Shimobe, S., Spagnoli, G., 2020. Fall cone tests considering water content, cone penetration index, and plasticity angle of fine-grained soils. *J Rock Mech Geotech Eng*, **12**, 1347–1355. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.02.005>.
- Spagnoli, G., Sridharan, A., Oreste, P., Bellato, D., Matteo, L. D., 2018. Statistical variability of the correlation plasticity index versus liquid limit for smectite and kaolinite. *Appl Clay Sci*, **156**, 152–159.
- Srinath, K.R. 2017. Python – The fastest growing programming language. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Volume **4**, Issue 12, 354-357.
- Swamidass, P.M., 2000. Mean absolute percentage error (MAPE). *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8_580.
- TS 1900-1. Türk Standardı. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-fiziksel özelliklerin tayini.
- Waske, B., Heinzl, V., Braun, M., Menz, G., 2007. Random Forests for classifying multi-temporal sar data, Proc. 'Envisat Symposium Montreux, Switzerland. <http://envisat.esa.int/envisatsymposium/proceedings/sessions/3D3/461589wa.pdf>.
- Watts J. D., Lawrence R. L., 2008. Merging Random Forest classification with an object-oriented approach for analysis of agricultural lands. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B7).
- Whyte, I. L., 1982. Soil plasticity and strength-a new approach using extrusion. *Ground. Eng.*, **15**, 1, 16-24.
- Yogatama, B. A., Tirta, B. A., 2021. Python application in geotechnical engineering practices. *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur Abad ke-21*.
- Zhang, W., Wu, C., Zhong, H. Li, Y., Wang, L., 2021. Prediction of undrained shear strength using extreme gradient boosting and random forest based on Bayesian optimization. *Geoscience Frontiers*, 469-477.

İnternet Kaynakları

<https://veribilimcisi.com/mse-rmse-mae-mape-metrikleri-nedir/> (14.07.2017).

<https://medium.com/human-in-a-machine-world/mae-and-rmse-which-metric-is-better-e60ac3bde13d> (14.07.2017).

Comparison of Overpass / Underpass in the Light of Various Parameters: Karabük-Safranbolu Case Study

Halil İbrahim YUMRUTAŞ^{1*}, Şeyda Çınar SARISOY²

¹ Karabük University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Karabük, Turkey.

² Karabük University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Karabük, Turkey.

Sorumlu yazar e-posta: *iyumrutas@karabuk.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3696-7016>
seydacinarsarisoy@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2307-0955>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 17.06.2021

Abstract

Keywords

Overpass;
Underpass;
Culvert;
SPSS;
ANOVA

Concrete, stone, steel, and wooden materials are used in the construction of pedestrian over/underpasses. However, there has still been uncertainty when preferring the construction of over or underpass. In this study, an inventory of pedestrian overpasses and underpasses in Karabük-Safranbolu region was presented in the light of various parameters. Two kinds of overpasses (constructed as steel and reinforced concrete) and an underpass were selected, and cost analyses were carried out comparatively. Additionally, face-to-face surveys were carried out with 300 people in 3 different over/underpass locations, and the results were evaluated by SPSS (statistical package for social sciences) ANOVA (analysis of variance). The advantages and disadvantages of over/underpasses in terms of cost, safety, ease of use/comfort, saving of time, user preference, aesthetic, construction period are revealed by means of the survey studies, data collected by General Directorate of Highways (KGM) and on-site observations, and then presented with tables and graphics. There has not been any standard, regulation, code, or design and safety criteria for the construction of underpasses/overpasses in our country and it is thought that this study will contribute to decision-making process of related authorities such as municipalities, general directorate of highways, etc.

Muhtelif Parametreler Işığında Üstgeçit/Altgeçit Mukayesesi: Karabük-Safranbolu Örneği

Öz

Anahtar kelimeler

Üstgeçit;
Altgeçit;
Menfez;
SPSS;
ANOVA

Yaya geçitlerinin inşasında ahşap, betonarme, çelik veya kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Ancak günümüzde, inşa edilecek olan yaya üst/altgeçitlerinden hangisinin tercih edilmesi gerektiği hususunda çeşitli belirsizlikler bulunmaktadır. Bu çalışmada Karabük-Safranbolu bölgesinde yer alan yaya üst ve altgeçitlerinin çeşitli parametreler ışığında bir envanteri oluşturulmuştur. Çelik ve betonarme olarak inşa edilmiş iki farklı üstgeçit ile bir altgeçit seçilerek mukayeseli bir şekilde maliyet analizleri yapılmıştır. Ayrıca 3 farklı lokasyonda her biri 100'er kişi olmak üzere toplamda 300 kişiyle yüz yüze anket çalışmaları gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar SPSS (statistical package for social sciences) ANOVA (analysis of variance) ile değerlendirilmiştir. Anket çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü'nden (KGM) elde edilen veriler ve yerinde gözlemler ile kullanıcılar tarafından ortaya konulan güvenlik, kullanım kolaylığı/konfor, zaman tasarrufu, altgeçit/üstgeçit tercihi, estetiklik gibi hususlarda avantaj ve dezavantajları tablo ve grafikler eşliğinde ortaya konulmuştur. Ülkemizde altgeçit/üstgeçitlerin imalatında yeterli düzeyde standart, tasarım ve güvenlik kriteri bulunmamakta olup çalışmanın Belediyeler, KGM gibi yetkili mercilerin karar verme süreçlerinde yararlanabileceği bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1 Introduction

Bridges are the structures, constructed to cross over natural obstacles such as stream, river, valley, or artificial obstacles such as highway and railway. According to General Directorate of Highways

(KGM) technical guide; A bridge is a highway structure that is constructed to cross obstacles such as bridges, valleys, highways, railroads with a span of 10 m or more (KGM 2013). Structures that

allow only pedestrians to cross the street are called pedestrian bridges or pedestrian crossings. They are also separated as overpass and underpass. The most important component of traffic is vehicles, but traffic also includes pedestrians. It is known that traffic accidents are among the leading causes of death when the statistics in our country and around the world are examined. When

detailed analyses of traffic accidents are made, it is obvious that the injuries and deaths caused by vehicle and pedestrian interaction have a very important role. As can be seen in Table 1, according to the data by TUIK (Turkey National Statistical Institute) approximately 10 % of traffic accidents in our country are caused by pedestrians (Int. res. 1).

Table 1. Faults that cause traffic accidents (Int. res. 1).

Trafik kazalarına neden olan kusurlar
Faults causing road traffic accidents

Yıl Year	Kusurlar - Faults											
	Toplam Total	Sürücü kusuru Driver faults	Toplam kusura oranı (%) Ratio to total faults	Yolcu kusuru Passengers faults	Toplam kusura oranı (%) Ratio to total faults	Yaya kusuru Pedestrian faults	Toplam kusura oranı (%) Ratio to total faults	Yol kusuru Road defects	Toplam kusura oranı (%) Ratio to total faults	Araç kusuru Vehicle defects	Toplam kusura oranı (%) Ratio to total faults	
2002	538 346	521 227	96.82	1 254	0.23	12 867	2.39	1 332	0.25	1 666	0.31	
2003	568 364	551 467	97.03	882	0.16	13 208	2.32	1 255	0.22	1 552	0.27	
2004	640 906	623 578	97.30	710	0.11	13 987	2.18	1 216	0.19	1 415	0.22	
2005	730 623	711 572	97.39	769	0.11	14 882	2.04	1 603	0.22	1 797	0.25	
2006	851 150	834 681	98.07	739	0.09	13 789	1.62	1 100	0.13	841	0.10	
2007	922 004	903 860	98.03	795	0.09	15 086	1.64	994	0.11	1 269	0.14	
2008	167 231	151 386	90.53	713	0.43	13 995	8.37	698	0.42	439	0.26	
2009	155 982	139 758	89.60	640	0.41	14 181	9.09	958	0.61	445	0.29	
2010	157 970	141 728	89.72	564	0.39	14 171	9.86	992	0.69	515	0.36	
2011	174 605	157 494	90.20	677	0.39	14 860	8.51	1 044	0.60	530	0.30	
2012	181 266	161 076	88.86	797	0.44	17 672	9.75	1 124	0.62	597	0.33	
2013	183 030	162 327	88.69	774	0.42	16 458	8.99	1 913	1.05	1 558	0.85	
2014	193 215	171 236	88.62	901	0.47	18 115	9.38	1 841	0.95	1 122	0.58	
2015	210 498	187 980	89.30	915	0.43	18 522	8.80	1 916	0.91	1 165	0.55	
2016	213 149	190 954	89.59	869	0.41	18 612	8.73	1 717	0.81	997	0.47	
2017	213 325	191 717	89.87	782	0.37	18 095	8.48	1 619	0.70	1 112	0.52	
2018	217 898	194 928	89.46	1 916	0.88	18 394	8.44	1 300	0.60	1 360	0.62	

From this point of view, it is obvious that pedestrian-vehicle interaction is an issue that needs to be taken into consideration and solutions should be discussed. Especially in developing countries, this problem is becoming more and more significant due to the high population in urban areas, rapid modernization, and urbanization, violating traffic rules for both vehicle drivers and pedestrians. Overpasses/underpasses are an essential part of urban life to protect pedestrians, who are an important element of sustainable transportation and are always vulnerable and at high risk in traffic.

Mutto *et al.* (2002) compared the situation before and after a pedestrian overpass at a specific location.

Surveys were carried out with 123 pedestrians at peak and off-peak times for pedestrian traffic and they asked pedestrians questions about security, the usability of overpass, etc. Most of the pedestrians expressed their discomforts such as overpasses with too many stairs, insufficient lighting, overpasses used by children as playgrounds, and visual pollution caused by the billboards on overpasses.

Mahdavinejad *et al.* (2012) evaluated pedestrian underpasses in terms of health and psychology in their studies and revealed some results with the survey studies.

Wu *et al.* (2014) studied the factors affecting the pedestrian preference of overpasses. Accordingly, they carried out a survey study with 1131 people and according to the results; eight main factors (gender, age, career, education level, driving license ownership, crossing time, presence and distance of alternative route) play a role in the preference of overpasses.

In their study, Önelçin and Alver (2018) analysed pedestrian behaviours that cross illegally (not using overpass) in various overpasses and the effect of the escalator on the preference of overpasses. They concluded that the number of escalators should be increased in pedestrian overpasses and regular maintenance/repair should be done, barriers should be placed in medians to prevent pedestrians from passing without using overpasses (illegally), and above all, awareness of pedestrians should be raised.

In this study, two kind of overpasses (constructed as steel and reinforced concrete) and an underpass were selected in Karabuk-Safranbolu region and

the advantages and disadvantages of over/underpasses were presented in terms of cost, safety, ease of use/comfort, saving of time, user preference, aesthetic, construction period by means of survey studies, data collected by KGM and on-site observations.

There has not been any standard, regulation, code, or design, and safety criteria for the construction of underpasses/overpasses in our country. Only with the standard of TS 12576 "Structural preventive and sign design criteria on accessibility in sidewalks and pedestrian crossings" are established however, this standard is not sufficient for underpass or overpass preference, but only some suggestions are provided to ensure the accessibility of all potential users effectively.

It is thought that this study will contribute to decision-making process of competent authorities such as municipalities, general directorate of highways, etc. and fill a gap in this regard. On the other hand, a standard, code, regulation, or guide should be established to develop a more effective decision process.

2 Pedestrian Bridges (overpasses) and Underpasses

Pedestrian bridges (overpasses) can be designed with various materials (wood, stone, reinforced concrete, metal, composite), with various construction techniques (beam, arch, cantilever, suspended), for various purposes in terms of their location (highway, railway, river overpasses) and various types of services in terms of access opportunities (stairs, ramps, elevators, escalators). Some examples of pedestrian overpasses are presented in Figure 1.



Figure 1. Some examples of pedestrian overpasses.

An underpass is a structure that allows passing under a highway or a railway (KGM 1997). According to another definition, it is a walking path

that ensures pedestrians pass under another road (Washington guidebook 2002). In some cases, the culverts, which are hydrologically designed engineering structures, also serve as underpasses, and in some cases, they are designed specifically for only pedestrians or vehicles. They can be constructed as reinforced concrete prefabricated box or as cast-in-situ reinforced concrete and as masonry. Some examples of pedestrian underpasses are presented in Figure 2.



Figure 2. Some examples of pedestrian underpasses.

2.1 Karabuk-Safranbolu region pedestrian over/underpasses

Karabük –Safranbolu road is a 2x3 divided arterial road under the responsibility of KGM 15th Regional Directorate. The population of Karabük province is 248.014. The population of Safranbolu district is 67.042. The number of registered vehicles in Karabük province (including districts) is 66.565 (Int. res. 2). The locations of the under/overpasses in Karabük-Safranbolu Region from Kardemir intersection to Safranbolu bus station are shown on the satellite image in Figure 3 and are listed below.



Figure 3. Karabük-Safranbolu pedestrian under/overpasses

- 1- Karabük Bus Terminal overpass
- 2- General Directorate of Security overpass (LOCATION 1)
- 3- School zone overpass
- 4- Kireç Ocağı zone overpass
- 5- Safranbolu Bus Terminal overpass

6- Gendarmery zone overpass (LOCATION 2)

7- Ulusoylar market zone underpass (LOCATION 3)

Within the scope of this study, various comparisons are made by selecting 1 steel beam overpass (Location 1), 1 reinforced concrete prefabricated beam overpass (Location 2), and 1 cast in-situ reinforced concrete underpass (Location 3) in 3 different locations in the region.

2.1.1 Location 1

It is a 40 m span steel beam overpass and constructed on 3+750 km of Karabuk-Safranbolu divided road in 2014. There is an elevator shaft but not constructed. Satellite photo and terrestrial photo are given in Figure 4.



Figure 4. General directorate of security overpass

2.1.2 Location 2

It is a 35.10 m span reinforced concrete prefabricated overpass and constructed on 4+500 km of Karabuk-Safranbolu divided road in 2011. Satellite photo and terrestrial photo are given in Figure 5.



Figure 5. Gendarmery zone overpass satellite photo and terrestrial photograph

2.1.3 Location 3

It is in 4.00x3.00 section cast in-situ reinforced concrete underpass and constructed on 100+765 km of Kastamonu-Karabuk divided road in 2008. In Figure 6, the point and terrestrial photographs of the underpass are seen on the satellite photograph.



Figure 6. Ulusoylar market zone underpass satellite photo and terrestrial photograph

3 Comparison of Over/Underpasses

If a need arises to construct over/underpasses in any region, It has been a controversial issue to decide overpasses or underpasses for decision-makers. Both types have some advantages and disadvantages against each other in terms of

certain parameters such as security, capacity, saving of time, cost, aesthetics, construction period, topography, expropriation, local demands, the historic/cultural/touristic characteristics of construction area, and public requirements, etc.). In this chapter, a comprehensive comparison is made, and it is aimed to contribute to the decision-making process of related authorities.

In this context, 3 different types of under/overpasses comparisons have been made in 3 different locations in the region.

3.1 Survey study

Within the scope of this study, face-to-face surveys each of which is 100 people and a totally of 300 people were carried out at peak hours in 3 different over/underpass locations (General Directorate of Security overpass, gendarmerie zone overpass, Ulusoylar market underpass) indicated in Figure 3. It was evaluated through SPSS (statistical package for social sciences) software and the results were presented with tables and graphics.

3.1.1 Location 1

Surveys were carried out by asking various questions to 100 people around General Directorate of Security steel beam overpass. The information obtained as a result of this survey study was evaluated statistically by SPSS-ANOVA analysis. In this location, 44 out of 100 respondents are male and 56 are female.

3.1.1.1 Frequency of overpass use

In observations, 81 people used the overpass. It is determined how often the overpass is used according to gender and age distribution. Accordingly, it is declared that 31 people always, 11 people frequently, 21 people occasionally and 18 rarely use the overpass. The frequency of the overpass use is given in Figure 7 and the distribution of frequency according to education level is given in Table 2.

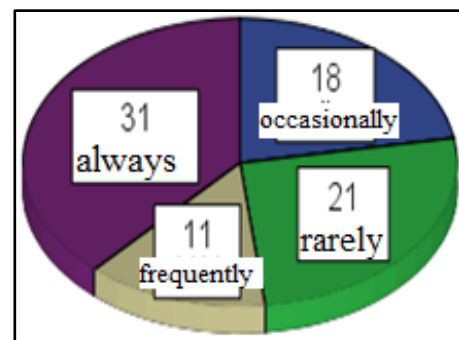


Figure 7. Frequency of overpass use

In conclusion, 31 people always, 11 people frequently, the remaining 58 people either never or occasionally/rarely prefer to use the overpass. This result reveals that the ratio of not using overpass is higher than the ratio of using it.

Table 2. Distribution of overpass use by educational level.

Overpass	Education Level				Total
	Primary School	Secondary School	University	Post Graduate	
Rarely	1	2	15	0	18
Occasionally	5	0	15	1	21
Frequently	2	1	7	1	11
Always	0	2	27	2	31
Total	8	5	64	4	81

According to Table 2, the educational level is an important parameter in terms of overpass preference. Awareness increases and crossing illegally (not using overpass) decreases in parallel with the increase in the level of education. In addition, 19 people who crossed illegally were asked how often they cross illegally. It is declared that 8 people always, 4 people frequently, 5 people occasionally and 2 people rarely cross illegally.

3.1.1.2 Overpass safety

Pedestrians using the overpass were asked to evaluate the cross in terms of safety compared to the underpass. 3 people answered it as “very safe”, 52 people answered it as “safe”, 15 answered it as “less safe”, 10 people answered it as “dangerous”, 1 person answered it as “very dangerous” and the results are given as pie chart in Figure 8.

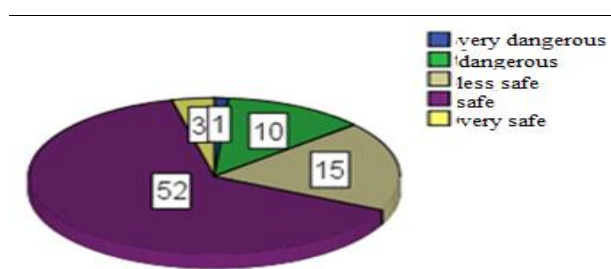


Figure 8. Overpass safety evaluation.

Pedestrians crossing illegally were asked to evaluate the illegal crossings in terms of safety. 2 people answered it as “safe”, 3 people answered it as “less safe”, 11 people answered it as “dangerous” and 3 people answered it as “very dangerous”.

According to general opinion, it is known that passing through overpasses is safe and illegal crossings are dangerous.

3.1.1.3 Ease of use / comfort

Pedestrians using the overpass were asked to evaluate the cross in terms of ease of use/comfort. 2 people answered it as “very hard”, 20 people answered it as “hard”, 22 people answered it as “less easy”, 36 people answered it as “easy” and 1 person answered it as “very easy” and the results are given as pie chart in Figure 9. According to general opinion, the overpass is easy/comfortable to use.

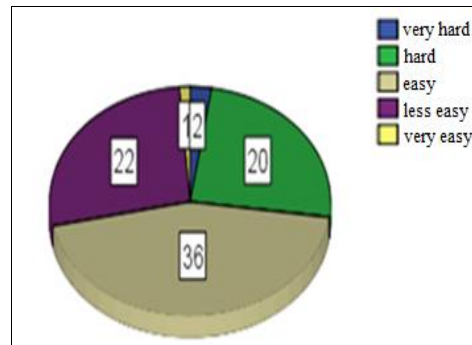


Figure 9. Ease of use/comfort evaluation.

Pedestrians crossing illegally were asked to evaluate the illegal crossings in terms of ease of use/comfort. 4 people answered it as “hard”, 10 people answered it as “easy”, 2 people answered it as “less easy” and 3 people answered it as “very easy”.

3.1.1.4 Preference of over/underpass

Pedestrians using the overpass were asked, “Would you prefer it if there were an underpass instead of an overpass here?” 66 people answered it as “yes”, 25 people answered it as “no”, 9 people said, “I have no idea” and the results are given as a pie chart in Figure 10.

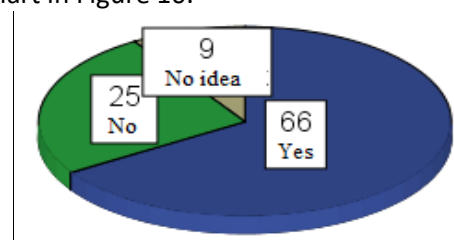


Figure 10. Preference of underpass instead of overpass

The general reasons for the majority of respondents to say “yes” are high number of stairs of the overpass, difficulty to get up and down the stairs, and lack of elevator or escalator. Those who answered as “no”, declared reasons such as being unsafe and inadequate or lack of lighting of underpasses.

From this point of view, it can be said that overpasses are generally not preferred due to

energy loss or getting tired (laziness), while underpasses are not preferred due to safety concerns.

3.1.1.5 Illegal crossing reasons

19 pedestrians crossing illegally were asked why they preferred to cross illegally. 12 people answered, “not to lose time”, 1 person answered, “It is not safe” and 1 person answered, “there is no vehicle while crossing” and 5 people declared various reasons. The results are given as a pie chart in Figure 11.

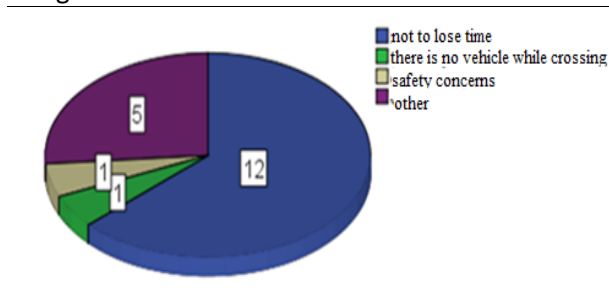


Figure 11. Illegal crossing reasons

The results obtained reveal that, as stated above, overpasses are generally not preferred due to energy loss or getting tired (laziness) but are also considered as a waste of time.

According to ANOVA analysis results;

- Gender and education level did not reveal significant results for the preferences above.
- Legal crossings decreased at the 5% significance level with the increase in the age of pedestrians.
- Even if there is an underpass instead of an overpass, pedestrians crossing illegally are still expected to cross illegally at the 1% significance level.

3.1.2 Location 2

Surveys were carried out by asking various questions to 100 people around the Gendarmery zone prefabricated reinforced concrete beam overpass. The information obtained as a result of this survey study was evaluated statistically using SPSS software. In this location, 58 out of 100 respondents are male and 42 are female.

3.1.2.1 Frequency of overpass use

In observations, 61 people used the overpass. It is determined how often the overpass is used according to gender and age distribution. Accordingly, It is declared that 9 people always, 10 people frequently, 24 people occasionally and 18 rarely use the overpass. The frequency of the

overpass use is given in Figure 12 and the distribution of frequency according to education level is given in Table 3.

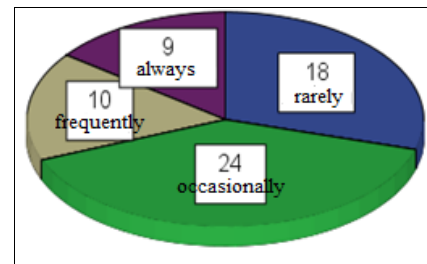


Figure 12. Frequency of overpass use

In conclusion, 9 people always, 10 people frequently, the remaining 81 people either never or occasionally/rarely prefer to use the overpass. This result reveals that it is remarkable that the rate of not using overpass is quite high.

Table 3. Distribution of overpass use by educational level.

Overpass	Education Level			Total
	Primary School	Secondary School	University	
Rarely	0	0	18	18
Occasionally	1	0	23	24
Frequently	0	0	10	10
Always	0	1	8	9
Total	1	1	59	61

According to general opinion and expected results, educational level is an important parameter in terms of overpass preference, awareness increases, and crossing illegally (not using overpass) decreases in parallel with the increase in the level of education but almost all respondents at this location have a university degree and to make a comparison or interpret the results in terms of education level will not be suitable, reliable, and reasonable.

In addition, 39 people who crossed illegally were asked how often they cross illegally. It is declared that 20 people always, 8 people frequently, 8 people occasionally and 3 people rarely cross illegally.

3.1.2.2 Overpass safety

Pedestrians using the overpass were asked to evaluate the cross in terms of safety compared to the underpass. 8 people answered it as “very safe”, 43 people answered it as “safe”, 10 people answered it as “less safe”, and the results are given as a pie chart in Figure 13.

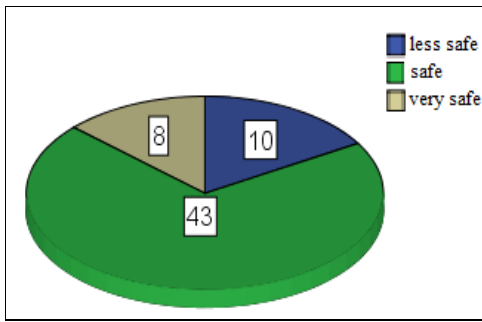


Figure 13. Overpass safety evaluation.

Pedestrians crossing illegally were asked to evaluate the illegal crossings in terms of safety. 4 people answered it as “safe”, 11 people answered it as “less safe”, 20 people answered it as “dangerous” and 4 people answered it as “very dangerous”.

According to general opinion, it is known that passing through overpasses is safe and illegal crossings are dangerous.

3.1.2.3 Ease of use / comfort

Pedestrians using the overpass were asked to evaluate the cross in terms of ease of use/comfort. 1 person answered it as “very hard”, 12 people answered it as “hard”, 16 people answered it as “less easy”, 32 people answered it as “easy” and the results are given as a pie chart in Figure 14.

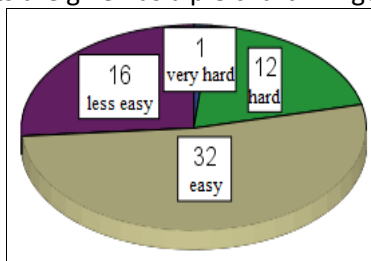


Figure 14. Ease of use/comfort evaluation

Pedestrians crossing illegally were asked to evaluate the illegal crossings in terms of ease of use/comfort. 1 person answered it as “hard”, 17 people answered it as “easy”, 4 people answered it as “less easy” and 17 people answered it as “very easy”.

According to general opinion, the overpass is easy/comfortable to use.

3.1.2.4 Preference of over/underpass

Pedestrians using the overpass were asked, “Would you prefer it if there were an underpass instead of an overpass here?” 46 people answered it as “yes”, 42 people answered it as “no”, 12 people said, “I have no idea” and the results are given as a pie chart in Figure 15.

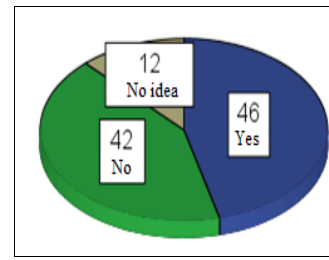


Figure 15. Preference of underpass instead of overpass

The general reasons for the majority of respondents to say “yes” are high number of stairs of the overpass, difficulty to get up and down the stairs, and lack of elevator or escalator. Those who answered as “no”, declared reasons such as being unsafe and inadequate or lack of lighting of underpasses.

From this point of view, it can be said that overpasses are generally not preferred due to energy loss or getting tired (laziness), while underpasses are not preferred due to safety concerns.

3.1.2.5 Illegal crossing reasons

39 pedestrians crossing illegally were asked why they preferred to cross illegally. 28 people answered, “not to lose time”, 2 people answered, “It is not safe” and 5 people answered, “there is no vehicle while crossing” and 4 people declared various reasons. The results are given in Figure 16.

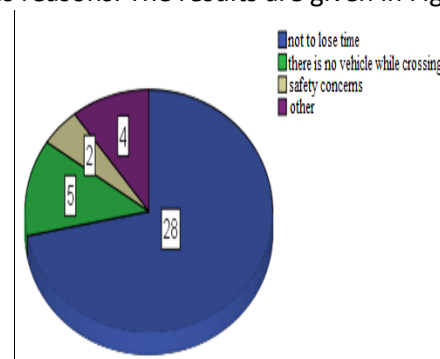


Figure 16. Illegal crossing reasons.

The results obtained reveal that, as stated above, overpasses are generally not preferred due to energy loss or getting tired (laziness) but are also considered as a waste of time.

According to ANOVA analysis results;

- Gender, age, and education level did not reveal significant results for the preferences above.
- Pedestrians who tend to cross illegally find their crossing as dangerous but find the overpass insufficient (very hard) in terms of

ease of use at the 5% significance level, however it is expected that they will prefer illegal crossing even if there is an underpass instead of an overpass.

3.1.3 Location 3

Surveys were carried out by asking various questions to 100 people around the Ulusoylar Market zone cast in-situ reinforced concrete underpass. The information obtained as a result of this survey study was evaluated statistically using SPSS software. In this location, 68 out of 100 respondents are male and 32 are female.

3.1.3.1 Frequency of underpass use

In observations, 63 people used the underpass. It is determined how often the underpass is used according to gender and age distribution. It is declared that 8 people always, 24 people frequently, 15 people occasionally and 16 rarely use the underpass. The frequency of the underpass use is given in Figure 17 and the distribution of frequency according to education level is given in Table 4.

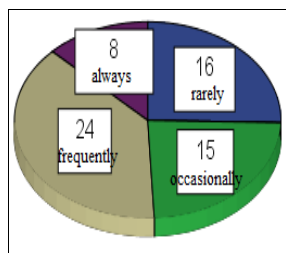


Figure 17. Frequency of underpass use

In conclusion, 8 people always, 24 people frequently, the remaining 68 people either never or occasionally/rarely prefer to use the underpass. This result reveals that it is remarkable that the rate of not using underpass is quite high.

Table 4. Distribution of underpass use by educational level.

Underpass	Education level				Total
	Primary School	Secondary School	University	Post Graduate	
Rarely	1	2	12	1	16
Occasionally	2	0	12	1	15
Frequently	2	6	15	1	24
Always	0	3	5	0	8
Total	5	11	44	3	63

It is known that the education level is an important parameter in terms of underpass preference. The increase in awareness and the decrease in illegal crossing in parallel with the increase in the level of education is expected according to general opinion. But somehow according to Table 4, the result is exactly vice versa of what is expected.

In addition, 37 people who crossed illegally were asked how often they cross illegally. It is declared that 23 people always, 10 frequently, 3 people occasionally and 1 person rarely cross illegally.

3.1.3.2 Underpass safety

Pedestrians using the underpass were asked to evaluate the cross in terms of safety compared to the overpass. 1 person answered it as “very safe”, 13 people answered it as “safe”, 18 answered it as “less safe”, 23 people answered it as “dangerous”, 8 people answered it as “very dangerous” and the results are given as pie chart in Figure 18.

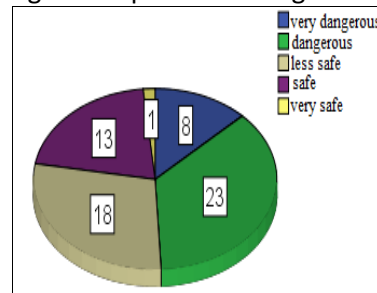


Figure 18. Underpass safety evaluation

Pedestrians crossing illegally were asked to evaluate the illegal crossings in terms of safety. 2 people answered it as “safe”, 3 people answered it as “less safe”, 11 people answered it as “dangerous” and 3 people answered it as “very dangerous”.

According to general opinion, passing through the underpasses is a safety concern and it is known that illegal crossings are dangerous.

3.1.3.3 Ease of use / comfort

Pedestrians using the underpass were asked to evaluate the cross in terms of ease of use/comfort. 2 people answered it as “very hard”, 8 people answered it as “hard”, 47 people answered it as “easy”, 4 people answered it as “less easy”, 2 people answered it as “very easy” and the results are given as pie chart in Figure 19.

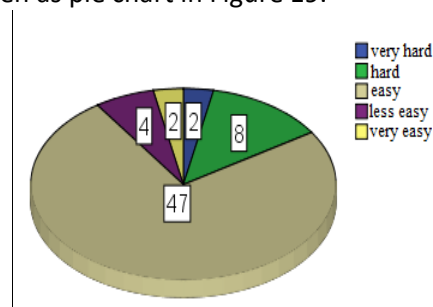


Figure 19. Ease of use/comfort evaluation.

Pedestrians crossing illegally were asked to evaluate the illegal crossings in terms of ease of

use/comfort. 2 people answered it as “very hard”, 2 people answered it as “hard”, 22 people answered it as “easy”, 1 person answered it as “less easy”, 10 people answered it as “very easy”. According to general opinion, an underpass is easy/comfortable to use.

3.1.3.4 Preference of over/underpass

Pedestrians using the underpass were asked, "Would you prefer it if there were an overpass instead of an underpass here?" 71 people answered it as “yes”, 28 people answered it as “no”, 1 people said, “I have no idea” and the results are given as a pie chart in Figure 20.

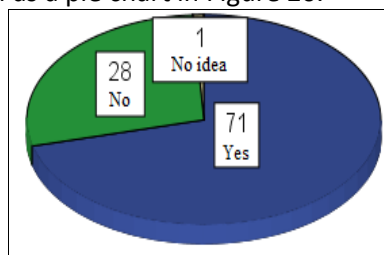


Figure 20. Preference of overpass instead of underpass

The general reasons for the majority of respondents to say “no” are high number of stairs of overpasses, difficulty to get up and down the stairs, and lack of elevator or escalator. Those who answered as “yes”, declared reasons such as being unsafe and inadequate or lack of lighting of underpasses.

From this point of view, it can be said that overpasses are generally not preferred due to energy loss or getting tired (laziness), while underpasses are not preferred due to safety concerns.

3.1.3.5 Illegal crossing reasons

37 pedestrians crossing illegally were asked why they preferred to cross illegally. 12 people answered, “not to lose time”, 5 people answered, “It is not safe” and 14 people answered, “there is no vehicle while crossing” and 6 people declared various reasons. The results are given as a pie chart in Figure 21.

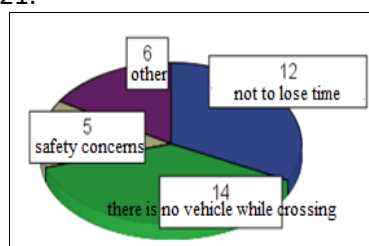


Figure 21. Illegal crossing reasons

The results obtained reveal that, as stated above, underpasses are generally considered as unsafe and waste of time.

According to ANOVA analysis results;

- Gender did not reveal significant results for the preferences above.
- Pedestrians using the underpass tend to find this cross easy/comfortable at the 5% significance level with the increase in the age.
- It was evaluated that with the increase of education level, pedestrians crossing illegally at the level of 1% significance were aware of the danger of this crossing.
- Those using the underpass found it unsafe at the 5% significance level, but they revealed that the underpass is easy / comfortable, however they preferred the overpass instead of the underpass.

3.1.4 All Locations ANOVA Results

- Gender and education level did not reveal significant results for the preferences of over/underpass in all locations.
- In general, it was observed that with the increase of age, legal crossings decreased at the 5% significance level, and pedestrians who cross illegally were aware that illegal crossings were dangerous.
- With the increase of age and education level, it was evaluated that the under/overpasses were comfortable / easy at the 1% significance level.

3.2 Cost analyses

In this part of the study, cost analysis for the over/underpasses in 3 different locations and has 3 different construction techniques/materials (a steel beam overpass, a reinforced concrete prefabricated overpass, and cast-in-situ reinforced concrete underpass) were carried out.

The data used was obtained from the General Directorate of Highways, and the cost information at different dates when the pedestrian crossings were built were updated to 2019 with the help of TUIK (Turkish Statistical Institute) actualization data and the results are presented in tables.

3.2.1 Location 1

It is a 40 m span steel beam overpass and constructed on 3+750 km of Karabuk-Safranbolu divided road in 2014 and cost data is given in Table 5.

Table 5. Location 1 cost data

No	Item No	Analysis Name	Unit of Measure	Quantity	2014 Unit Price (TL)	2014 Amount (TL)	2019 Unit Price (TL)	2019 Amount (TL)
1	23.101 ÖZEL	İnşaat bünyesine giren her türlü profil demiri ve saclarla kiriş, başlık ve bağlantı vb. İmalatların yapılması, galvanizlenmesi ve imalatların yerine konulması (tüm malzeme ve nakliyeler dahildir.)-Beams, posts and connections, etc. with all kinds of profile iron and sheets included in the construction. Manufacturing, galvanizing and placing (all materials and carriage are included.)	TON	56	5.250,46	294.025,76	10.373,27	580.902,87
2	KGM/14.213 ÖZEL	Her derinlikte, her cins ve klastaki zeminde kuruda köprü temelinin kazılması (nakliyeler dahildir.)-Excavation of the foundation of the bridge in dry form on soils of all depths and all types and classes (carriage included)	M3	100	38,00	3.800,00	75,08	7.507,61
3	KGM/16.101/ K-1 ÖZEL	Köprü temellerinde kuruda veya suda her dozda demirsiz beton (C16/20) (tüm malzeme ve nakliyeler dahildir)- Any dose of plain concrete (C16 / 20) on bridge foundations, dry or in water (all material and carriage included)	M3	8	144,15	1.153,20	284,80	2.278,36
4	KGM/16.120/ K ÖZEL	Her türlü inşaatta temel dışında kuruda veya suda her dozda demirsiz beton (c25/30) (tüm malzeme ve nakliyeler dahildir) Plain concrete (c25 / 30) in all kinds of construction except foundation in all doses in dry or water (including all materials and carriage)	M3	10	177,76	1.777,60	351,20	3.511,98
5	KGM/16.133/ K ÖZEL	Köprülerde kuruda veya suda her dozda demirli beton (c30/37) (tüm malzeme ve nakliyeler dahildir)-Any dose of plain concrete (c30 / 37) on bridges, dry or in water (all material and carriage included)	M3	54	417,04	22.520,16	823,94	44.492,79
6	KGM/23.015/ K ÖZEL	Betonarme için ø 14 - ø 32 mm.lık ince nervürlü çelik temini ve işçiliği (tüm malzeme ve nakliyeler dahildir)- Supply and labor of ø 14 - ø 32 mm ribbed bar for reinforced concrete (all materials and carriage included)	TON	3	2.368,19	7.104,57	4.678,80	14.036,41
7	KGM/23.176/ K ÖZEL	İnşaat bünyesine giren profillemeli demir zati bedeli, profilden üst geçit korkuluk işçiliği, yüklenmesi taşınması, galvanizlenmesi, boşaltılması istifi ve yerine montajı-cost of the profiled iron included in the construction, labour of the rail overpass from the profile, loading, carriage, galvanizing, unloading, storage and placement.	TON	8	3.700,08	29.600,64	7.310,20	58.481,60
8	ÖZEL-1	1.5 metre yüksekliğinde dekoratif panel çit yapılması ve yerine montajı (tüm malzeme ve nakliyeler dahildir.)-1.5 meter in height decorative panel fence and placing (all materials and carriage are included.)	MT	750	30,04	22.530,00	59,35	44.512,23
9	ÖZEL-2	Yaya üst geçit köprülerinde çarpma etkisini azaltan anti-statik zemin kaplaması yapılması (tüm malzeme, montaj ve nakliyeler dahil) (2 cm kalınlıkta)-Anti-static floor covering that reduces the impact of pedestrian overpass bridges (including all material, placement and carriage) (2 cm in thickness)	M2	600	62,78	37.668,00	124,03	74.420,18
TOTAL AMOUNT (Vat excluded)						420.179,93		830.144,03

Here, the cost of 830.144,03 TL obtained for 2019 is for the 40.00 m span (length) of the overpass, and to be able to make an accurate comparison, the unit cost (for one meter) must be taken into consideration. Accordingly, 830.144,03 TL is divided by 40 meters and the unit cost of the construction is obtained as 20.753,60 TL/m

3.2.2 Location 2

It is a 35,10 m span reinforced concrete prefabricated beam overpass and constructed on

4+500 km of Karabuk-Safranbolu divided road in 2011 and cost data is given in Table 6.

Here, the cost of 250.587,67 TL obtained for 2019 is for the 35.10 m span (length) of the overpass, and to be able to make an accurate comparison, the unit cost (for one meter) must be taken into consideration. Accordingly, 250.587,67 TL is divided by 35.10 meters and the unit cost of the construction is obtained as 7.139,25 TL/m.

Table 6. Location 2 cost data

No	Item No	Analysis Name	Unit of Measure	Quantity	2011 Unit Price (TL)	2011 Amount (TL)	2019 Unit Price (TL)	2019 Amount (TL)
1	14.113	Kurada köprü temeli kazısı-Bridge foundation excavation in dry	m3	63,150	33,38	2.107,95	82,67	5.220,90
2	16.023/K-1	her dozda demirli beton-every dose of plain concrete	m3	2,268	56,41	127,94	139,71	316,87
3	16.101/K-1	Köprü temellerinde kuruda veya suda her doz demirsiz beton-Any dose of plain concrete, dry or in water, on bridge foundations	m3	24,608	65,23	1.605,18	161,56	3.975,66
4	16.132/K-2	Öngermeli hariç köprü için kuruda veya suda her dozda demirli beton-" Reinforced concrete, dry or in water, in all doses for bridges, except for pre-stressed	m3	0,938	214,29	201,00	530,75	497,84
5	16.136/K-1	Prefabrik kirişlerin yerine konulması-Replacing prefabricated beams	ton	191,817	56,92	10.918,22	140,98	27.041,95
6	16.137/K-1-A	Köprülerin öngermeli boyuna ve enine kirişlerde her dozda demirli beton-Reinforced concrete in longitudinal and transverse beams of prestressed bridges in all doses	m3	79,934	493,43	39.441,83	1.222,11	97.688,43
7	16.138 /ÖZEL	Köprülerde prekast bordür elemmanı yapılması- precast border elements in bridges	ad.	43	47,06	2.023,58	116,56	5.011,95
8	16.139 /ÖZEL	Köprülerde prekast bordür elemmanı yerine montajı-Installation of precast border element in bridges	ad.	43	22,03	947,29	54,56	2.346,22
9	23.002/K-6	Öngörme çeliğinin yerine konulması-Replacing the prestressing reinforcements	ton	0,389	5 795,90	2.254,61	14.355,12	5.584,14
10	21.053	Köprülerde döşeme, kiriş ve kemer taşıyıcı iskeleleri-Slab, beam and arch supporting scaffoldage in bridges	m3	0,089	17,94	1,60	44,43	3,95
11	23.003/10	Ana kirişlerin enleme kirişlere tespiti-Fastening main beams to cross beams	ad.	6	19,16	114,96	47,45	284,73
12	23.014/K	5 - 12 mm.lik ince nervürlü çelik işçiliği-ribbed bar workmanship of 5 - 12 mm.	ton	5,230	372,64	1.948,91	922,94	4.827,00
13	23.015/K	14 - 28 mm.lik kalın nervürlü çelik işçiliği-ribbed bar workmanship of 14 - 28 mm.	ton	2,914	307,66	896,52	762,00	2.220,48
14	3793	Kılıf borusu temini-Supply of casing pipe	m	39,740	1,43	56,83	3,54	140,75
15	3805	Neopren mesnet tertibatı-Neoprene bearing material	dm3	26,000	26,19	680,94	64,87	1.686,53
16	3000A	Dökme Çimento-bulk cement	ton	12,067	101,78	1.238,18	252,09	3.041,92
17	3000B	P.Ç. 42.5 Çimento-P.Ç. 42.5 Cement	ton	4,751	130,12	618,20	322,28	1.531,14
18	3790C	8 - 12 mm.' lik (Nervürlü) Demir-8 - 12 mm (Ribbed) bar	ton	5,596	687,95	3.849,77	1.703,90	9.535,00
19	3790D	14 - 32 mm.' lik (Nervürlü) Demir-14 - 32 mm.(Ribbed) bar	ton	3,206	674,04	2.160,97	1.669,44	5.352,24
20	3791b	Profil demirleri (I - U - T - W)-Profile bars (I - U - T - W)	ton	2,496	856,72	2.138,37	2.121,90	5.296,26
21	3792/1	Yüksek dayanımlı ön germe çeliği temini-Supply of high strength pre-stress steel	ton	0,433	2 927,82	1.267,75	7.251,54	3.139,92
22	04.613/1-A 1-Ö	Normal akışkanlaştırıcı yüksek mukavemet katkısı-Normal plasticizer high strength additive	kg	5,270	1,40	7,38	3,47	18,27
23	04.613/1-A 3-Ö	Süper akışkanlaştırıcı yüksek mukavemet katkısı-Super plasticizer high strength additive	kg	354,310	3,85	1.364,09	9,54	3.378,55
24	07.006/K	Prefabrik elemanların yerine nakli-Carriage of prefabricated elements	ton	191,816	14,93	2.863,81	36,98	7.093,01
25	07.006/K	Taze beton nakli-carriage of cast in place concrete	m3	27,815	30,63	851,97	75,86	2.110,14
26	08.007/K	Kum - Çakıl yıkanması-Sand - Gravel washing	m3	131,349	4,51	592,38	11,17	1.467,20
27	07.005/K	Kum - Çakılın beton tesisine taşınması-sand-gravel carriage	m3	34,640	8,99	311,41	22,27	771,30
28	07.006/K	Kumun ve çakılın imalat tesisine taşınması (Prekast)-carriage of sand and gravel to the construction site (Precast)	m3	97,851	30,46	2.980,54	75,44	7.382,12
29	07.006/K	Çimentonun imalat tesisine taşınması (Prekast)-Carriage of cement to the construction site (Precast)	ton	32,993	79,98	2.638,78	198,09	6.535,66
30	09.001/K-1	Çimento yüklenmesi, boşaltılması ve istif (Prekast)-Cement loading, unloading and storage (Precast)	ton	32,993	1,39	45,86	3,44	113,59
31	09.001/K	Çimentonun yüklenmesi, taşınması, boşaltılması ve istif-cement loading, carriage, unloading and storage	ton	12,067	25,45	307,11	63,03	760,63
32	07.006/K	Nervürlü çeliğin imalat yerine taşınması (Prekast)-Carriage of the ribbed bar to the construction site (Precast)	ton	6,368	236,64	1.506,92	586,10	3.732,31
33	09.012/K-1	İmalat yerine taşınan nervürlü çelik ile öngörme çeliğinin yüklenmesi, boşaltılması ve istif (Prekast)-Loading, unloading and storage of ribbed bar and prestressing reinforcement carried to the construction site (Precast)	ton	9,325	9,68	90,27	23,98	223,57
34	07.006/K	Öngörme çeliğin imalat yerine taşınması (Prekast)-carriage of the prestressed reinforcement to the construction site (Precast)	ton	0,442	298,17	131,79	738,50	326,42
35	09.012/K	Her cins betonarme, profil, lama dem; yükleme, taşıma, boşaltma ve istif-All kinds of reinforced concrete, profile, lama beam; loading, carriage, unloading and storage	ton	2,496	256,34	639,82	634,90	1.584,70
36	07.006/K	Kum-Çakılın imalat yerine taşınması (Çephe panelleri)-Carriage of sand-gravel to the construction site (facade panels)	m3	2,341	30,46	71,31	75,44	176,61
37	07.006/K	Çimentonun imalat yerine taşınması (Çephe panelleri)-Carriage of cement to the construction site (facade panels)	ton	0,716	79,98	57,27	198,09	141,83
38	07.006/K	Nervürlü çeliğin imalat yerine taşınması (Çephe panelleri)-Carriage of ribbed bars to the construction site (facade panels)	ton	0,625	236,64	147,90	586,10	366,31
39	2640	Drenaj Hendeği ile her türlü büz yanlarına kum-çakıl dolgu yapılması-sand-gravel backfilling on the sides of all kinds of drainage ditches	m3	40,050	7,83	313,59	19,39	776,69
40	23.176/K	Profilli demirden korkuluk işçiliği (Boyama hariç)-Profiled iron railing work (except painting)	ton	2,261	2 359,75	5.335,39	5.844,56	13.214,56
41	25.001/İB-2	Demir yüzeylerin özel (Silis quartz) kumla, kompresör kullanılarak raspa edilmesi ve parlak bir yüzey edilinceye kadar kumlanması-Blasting iron surfaces with special (Silica quartz) sand using a compressor and sandblasting until a bright surface is obtained.	m2	159,730	16,45	2.627,56	40,74	6.507,86
42	25.001/İB-1 ÖZEL	Kum raspa veya zımpara ile temizlenmiş demir imalatın epoxy zinc rich primer astar, epoxy high build arakat ve epoxy son kat boya ile boyanması-Painting of iron manufacturing cleaned with sand blasting or sandpaper with epoxy zinc rich primer primer, epoxy high build undercoat and epoxy top coat paint.	m2	159,730	23,16	3.699,35	57,36	9.162,44
TOTAL AMOUNT (Vat excluded)					101.175,11		250.587,67	

3.2.3 Location 3

It is a 25 m in length cast in-situ reinforced concrete underpass and constructed on 100+765 km of Kastamonu-Karabuk divided road in 2008 and cost data is given in Table 7.

Here, the cost of 171.747,19 TL obtained for 2019 is for the 25 m length of the overpass, and to be able to make an accurate comparison, the unit cost (for one meter) must be taken into consideration. Accordingly, 171.747,19 TL is divided by 25 meters and the unit cost of the construction is obtained as 6.869,89 TL/m

Table 7. Location 3 cost data

No	Item No	Analysis Name	Unit of Measure	Quantity	2008 Unit Price (TL)	2008 Amount (TL)	2019 Unit Price (TL)	2019 Amount (TL)
1	14111 Özel	Her derinlikte, her cins ve klastaki zeminde, kuruda tahkimat işleri ve kutu menfez temel kazısı yapılması (kazının depoya nakli dahil)-Dry fortification works and box culvert foundation excavation (including the carriage of the cutting material to warehouse) for all depths, all types and classes soils.	m3	461,580	4,60	2.123	14,479	6.683,27
2	16.100/K-1 Özel	Her türlü inşaat temellerinde (Köprü temelleri hariç) kuruda veya suda her dozda demirsiz beton-Plain concrete in all kinds of construction foundations (except for bridge foundations), dry or in water, in all doses.	m3	12,250	94,05	1.152	296,035	3.626,43
4	16.134/1 Özel	Kutu menfezlerde kuruda veya suda her dozda demirli beton (C25)-Reinforced concrete (C25) in any dose in dry or water in box culverts	m3	183,456	161,14	29.562	507,210	93.050,73
5	21.051	Menfezlerde 6 m ve daha küçük göz açıklıkları için döşeme kiriş ve kemer taşıyıcı iskeleleri-Slab beam and arch supporting scaffolds for the culverts 6 m and smaller in length	m3	300,000	3,85	1.155	12,118	3.635,52
6	3790 Özel	İnşaat Bünyesine Giren Demir Zati Bedeli demir işçiliği (8-50mm) ve nakli-Steel material cost, steel works (8-50mm) and carriage	ton	11,100	1.162,36	12.902	3.658,686	40.611,42
7	2640	Elenmemiş malzeme ile sanat yapıları temel tabanına beton yol ve tretuvar altlarına kum çakıl tabakası serilmesi,drenaj hendekleri ile her türlü bütz yollarına kum çakıl dolgu yapılması (Malzeme nakli dahil) Laying a layer of sand gravel under the concrete road and pavement under the foundation base of the engineering structures with unsieved material, filling the drainage ditches with sand and pebble (including material carriage)	m3	52,235	6,81	355,720	21,435	1.119,68
8	16.100/K-1 Özel	Her türlü inşaat temellerinde (Köprü temelleri hariç) kuruda veya suda her dozda demirsiz beton (C16) Plain concrete in all kinds of construction foundations (except for bridge foundations), dry or in water, in all doses (C16)	m3	0,750	94,05	70,538	296,035	222,03
9	16.131/K-1 Özel	Her türlü inşaat (Kirişli ve kutu menfezler, köprüler ve betonarme kazık hariç, plak ve kompozit menfezler dahil) kuruda veya suda her dozda demirli beton (Kullanılan her türlü malzeme ve taşımalar dahildir) (C25/30) In all kinds of construction (except for beam and box culverts, bridges and reinforced concrete piles, including slab and composite culverts) all doses of reinforced concrete in dry or water (Including all kinds of materials and carriage) (C25 / 30)	m3	10,620	141,04	1.497,845	443,943	4.714,67
10	3790 Özel	İnşaat Bünyesine Giren Demir Zati Bedeli ,demir işçiliği (8-50mm) ve nakli-Steel material cost, steel works (8-50mm) and carriage	ton	0,454	1.162,36	527,711	3.658,686	1.661,04
11	14.110 Özel	Her derinlikte her cins ve klastaki zeminde kuruda drenaj,kanalizasyon hendeği ve duvar temelinin kazılması (kazının depoya nakli dahil)-Dry drainage, sewer ditch and excavation of the wall foundation (including the carriage of the cutting material to the warehouse) for all depths, all types and classes soils	m3	8,640	3,68	31,795	11,583	100,08
12	16.100/K-1 Özel	Her türlü inşaat temellerinde (Köprü temelleri hariç) kuruda veya suda her dozda demirsiz beton (C16) All kinds of construction foundations (except bridge foundations), dry or water, any dose of plain concrete	m3	1,440	94,05	135,432	296,035	426,29
13	16.131/K-1 Özel	Her türlü inşaat (kirişli ve kutu menfezler, köprüler ve betonarme kazık hariç, plak ve kompozit menfezler dahil) kuruda veya suda her dozda demirli beton (Beton santrali ile) (Kullanılan her türlü malzeme ve taşımalar dahildir) (C25/30)-In all kinds of construction (except for beam and box culverts, bridges and reinforced concrete piles, including slab and composite culverts) all doses of reinforced concrete in dry or water (Including all kinds of materials and carriage) (C25 / 30)	m3	22,950	141,04	3.236,868	443,943	10.188,48
14	3790 Özel	İnşaat Bünyesine Giren Demir Zati Bedeli ,demir işçiliği (8-50mm) ve nakli-Steel material cost, steel works (8-50mm) and carriage	ton	1,560	1.162,36	1.813,282	3.658,686	5.707,55
TOTAL AMOUNT (Vat excluded)					54.563,87	171.747,19		

According to the calculations made for the constructions in selected locations, it is observed that the unit cost of the reinforced concrete prefabricated overpass (7.139,25 TL/m) is approximately 66% less than the unit cost of the steel overpass (20,753.60 TL/m). Besides, it is calculated that the unit cost of the underpass (6.869,89 TL/m) is approximately 4% less than the unit cost of the reinforced concrete prefabricated overpass (7.139,25 TL/m).

Based on this result, the costs of an underpass and a reinforced concrete overpass are almost the same, but the cost of steel overpass is much higher. However, it should not be ignored that there are also various parameters such as (construction techniques, climatic conditions, expropriation need, aesthetic designs, topography, location of construction, etc.) which can affect construction costs.

3.3 Aesthetic

Pedestrian overpasses and underpasses are structures designed as a solution both to enable pedestrians to cross a road safely and provide continuity of heavy vehicle traffic at the same time, as well as being aesthetic engineering structures.

Pedestrian overpasses can be regarded as one of the visual elements of a city not only for their function but also for their aesthetic contribution to urban design. Although there are a smaller number of overpasses when compared to other urban design structures, their effect on the aesthetic is much more outstanding [11].

For this reason, besides the principles of ensuring pedestrian safety and vehicle traffic flow, presenting engineering solutions that reflect the characteristics of the region in which it is located will aesthetically contribute to the region and will increase the added value in the construction of overpasses. However, especially for historical/touristic and natural sites, preferring an underpass instead of an overpass will prevent deteriorating of present urban texture and urban visibility. In Figure 22, examples of overpasses with an aesthetic value reflecting the urban texture in our country are given.



Figure 22. Aesthetic overpass examples in our country

3.4 Construction duration

Another point to be taken into consideration in the overpass/underpass comparison is the construction duration. This duration can be affected by construction technique, material, climatic conditions in construction period, pedestrian/vehicle traffic in the construction period, public procurement process, etc. In this respect, for the construction period of overpasses traffic flow is not almost interrupted especially in precast applications traffic flow is interrupted hardly ever.

However, in underpass construction, if it is a road/railway that has not been opened to traffic yet, it won't be a problem, but if it is to be built on a road with active vehicle traffic, the vehicle traffic will have to be interrupted at certain times, in some cases, the road will have to be closed completely or the main road route will have to be bypassed by directing the traffic to alternative routes.

Additionally, it should be considered that the traffic interruption due to underpass construction or bypass to alternative routes may be hazardous in terms of causing traffic accidents. Figure 23 shows a traffic accident that occurred recently in our country, during the culvert/underpass construction, where 8 people died, and 4 people were injured.



Figure 23. Fatal accident caused by underpass/culvert construction (Int. res. 3).

When it is evaluated in terms of both construction duration and traffic disruption and/or risk of accident, choosing to construct an overpass especially in main arteries will be a much more reasonable approach.

4 Results and Discussions

Transportation has been a vital factor for economic and socio-cultural development throughout human history. Due to the availability of suitable transportation facilities; nations, regions, cities, industries, institutions, businesses have developed or fall behind. Today, the parallelism between the development of transportation facilities and the development of countries or regions can be observed prominently. Particularly, the phenomenon of globalization makes the importance of transportation more and more evident day by day.

Transportation is the displacement of humans, animals, plants, and goods from one place to another for a specific purpose. Traffic can be defined as the movements of vehicles used in transportation facilities (cars, buses, trucks, etc.) and the movements of mobile objects (pedestrians and animals) on a road or railway. However, the "human" factor both as a driver inside the vehicle and as a pedestrian outside the vehicle is a primary factor affecting traffic.

National or international traffic accident statistics reveal that accidents caused by the interaction of vehicles and pedestrians are in non-negligible amounts and various solutions are tried to be developed to overcome this matter. Especially on urban roads, pedestrian overpasses or underpasses are constructed for reasons such as providing less interaction of pedestrians and vehicles, preventing interruptions in vehicle traffic and time loss, and preventing accidents that may occur due to probable illegal crossings.

There are several parameters for the construction of over/underpasses such as safety, capacity, saving of time, cost, aesthetics, topography, construction period, expropriation, local demands, historical/cultural/touristic characteristics of construction area, and public requirements, etc. However, decision-makers (General Directorate of Highways, Municipalities, Provincial Administrations), need a guide on which of these two types (underpass/overpass) should be preferred.

There is not enough standards/codes or guide for the construction of underpasses/overpasses in our country. Only with the standard of TS 12576

"Structural preventive and sign design criteria on accessibility in sidewalks and pedestrian crossings" are established however, this standard is not sufficient for underpass or overpass preference, but only some suggestions are provided to ensure the accessibility of all potential users effectively. It is thought that this study will contribute to the decision-making process of competent authorities such as municipalities, general directorate of highways, etc. and fill a gap in this regard. On the other hand, a standard, code, regulation, or guide should be established in order to develop a more effective decision mechanism.

Within the scope of the study, an inventory of pedestrian overpasses and underpasses in the Karabuk-Safranbolu region was presented, two different overpasses constructed in steel and prefabricated reinforced concrete and a cast-in-situ reinforced concrete underpass were compared in three different locations, and cost analyses were carried out.

Accordingly, the costs of underpass and reinforced concrete overpass are almost the same, but the cost of steel overpass is much higher. However, it should not be ignored that there are also various parameters such as (construction techniques, climatic conditions, expropriation need, aesthetic designs, topography, location of construction etc.) which can affect construction costs.

Another important point to be considered is that the underpass/overpass preference cannot be solved with a basic engineering approach, but the preferences of the users should be taken into consideration. In this context, face-to-face surveys were carried out with 300 people in 3 different over/underpass locations, and the results were evaluated through SPSS (statistical package for social sciences) software. The advantages and disadvantages of over/underpasses in terms of cost, safety, ease of use/comfort, saving of time, user preference, aesthetic, construction period is revealed by means of the survey studies.

According to survey results;

- The ratio of not using overpass or underpass is quite high. This is an issue that needs to be considered and needs to be created solutions.
- While an increase in the level of education is expected to increase the use of underpass /overpass, but the results do not verify this expectation. From this point of view, this matter is not only related to education and it must be handled in many

ways such as sociological, psychological, cultural, etc.

- According to general opinion, it is known that crossing through overpasses is safe, and passing through underpasses is a safety concern and it is known that illegal crossings are dangerous.
- The general tendency is that the use of overpass/underpass is easy/comfortable.
- Overpasses are generally not preferred due to energy loss or getting tired (laziness), while underpasses are not preferred due to safety concerns, and the use of both is seen as a waste of time.

As a result of ANOVA analysis performed for both 100 people in each location and 300 people in all locations;

- Gender and education level did not reveal significant results for the preferences of over/underpass in all locations.
- In general, it was observed that with the increase of age, legal crossings decreased and pedestrians who cross illegally were aware that illegal crossings were dangerous.
- With the increase of age and education level, it was evaluated that the under/overpasses were comfortable / easy.
- It is thought that the lack of significant results especially related to education level is due to the fact that the locations selected for the sampling are located in the University region and the majority of the participants have bachelor or master's degree. It is considered that increasing / changing the sampling area will provide more significant results in terms of education level.
- Even in the case of an underpass instead of an overpass, pedestrians crossing illegally are still expected to cross illegally so it does not matter for the of user preferences in terms of over/underpass.

Over/underpasses are engineering solutions for ensuring pedestrian safety and vehicle traffic flow especially in places which have a traffic congestion, on the other hand, overpasses have an aesthetic aspect. Therefore, besides presenting engineering solutions for ensuring pedestrian safety and vehicle traffic flow, reflecting the characteristics of the region in which they are located will aesthetically contribute to the region and will increase the added value in terms of construction of overpasses.

However, especially for historical/touristic and natural sites, preferring an underpass instead of an overpass will prevent deteriorating of present urban texture and urban visuality.

Another point to be taken into consideration in the overpass/underpass comparison is the construction duration. This duration can be affected by construction technique, material, climatic conditions in the construction period, pedestrian/vehicle traffic in the construction period, public procurement process, etc. In this respect, for the construction period of overpasses traffic flow is not almost interrupted especially in precast applications traffic flow is interrupted hardly ever.

However, in underpass construction, if it is a road/railway that has not been opened to traffic yet, it will not be a problem, but if it is to be built on a road with active vehicle traffic, the vehicle traffic will have to be interrupted at certain times, in some cases, the road will have to be closed completely or the main road route will have to be bypassed by directing the traffic to alternative routes.

Additionally, it should be considered that the traffic interruption due to underpass construction or bypass to alternative routes may be hazardous in terms of causing traffic accidents.

When it is evaluated in terms of both construction duration and traffic disruption and/or risk of accident, choosing to construct an overpass especially in main arteries will be a much more reasonable approach.

Internet References

- 1- http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1051, (04.09.2019).
- 2- <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>, (04.09.2019).

5 References

- Aksu, Ö.V., 2014. Examination of design criteria in pedestrian bridges: Sample of Trabzon city. *Istanbul University Forest Faculty Journal*, **64(1)**, 12-28.
- KGM, 2013. Highway Technical Guide. General Directorate of Highways, Ankara, Türkiye.
- KGM, 1997. Highway Traffic Code. General Directorate of Highways, Resmî Gazete, Ankara, Türkiye.
- Mahdavinejad, M., Hosseini A., Alavibelmana M., 2012. Enhancement HSE factors in pedestrian underpass regarding to chemical hazards, Mashhad, İnan. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **51(12)**, 10-14.
- Mutto M., Kobusingye O.C, Lett R.R, 2002. The effect of on pedestrian injuries on a major highway in Kampala-Uganda". *African Health Sciences* **2(3)** 89-93.
- Otak I., 1997. Pedestrian Facilities Guidebook, Washington State Department of Transportation County Road Administration Board, Washington, USA.
- Önelçin P., Alver Y., 2018. Investigation of illegal road users' behavior at overpass locations and the effect of an escalator on the overpass usage ratio. *Pamukkale University Engineering Sciences Journal*, **24(6)**, 1100-1106.
- Yao W., Jian L., Hong C., Lei W., 2014. Identification of contributing factors to pedestrian overpass selection. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* **1(6)**.

3-

- <http://beyazgazete.com/haber/2018/3/30/guncell-eme-bayburt-ta-iki-arac-menfez-cukuruna-dustu-aciklamasi-8-olu-4-yarali-4407368.html>, (04.09.2019).

AA6061-B₄C MMK_p Malzemelerin Özelliklerine Süper Katı Üzeri Sıvı Faz Sinterleme İşlemlerinin Etkisi

Yusuf ÖZÇATALBAŞ^{1*}, Deniz KÖSE²^{1,2} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06560.Sorumlu yazar e-posta: ¹yusufoz@gazi.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4256-8492>²denizkse@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5767-2145>

Geliş Tarihi: 08.02.2021 Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Bu çalışmada, katı hal sinterleme ile üretilen AA6061 matrisli ve farklı B₄C parçacık takviye oranlarındaki metal matrisli kompozit (MMK_p) malzemelerin özelliklerine süper katı üzeri sıvı faz sinterleme (SKSFS) işlemlerinin etkisi araştırılmıştır. Ön alaşımlı AA6061 tozu ile ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 oranlarda B₄C seramik parçacık takviye elamanı, Turbula da 45 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar, 350 MPa basınçta soğuk preslenip devamında 400°C sıcaklıkta 1 saat argon atmosferi ortamında yağlayıcı giderme işlemine tabi tutulmuştur. Ardından 560°C sıcaklıkta 1 saat argon atmosferi altında katı hal sinterleme (KHS) işlemi uygulanarak MMK_p malzemeler üretilmiştir. Devamında bu malzemelere, 610°C ve 620°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta 1 saat süre ile SKSFS işlemleri uygulanmıştır. SKSFS ile ikincil bir sinterleme işlemi uygulanan MMK_p malzemelerin mikroyapıları ve fiziksel özellikleri; mevcut fazlar, sertlik ve yoğunluk ölçümleri çapraz kırılma dayanımları (ÇKD) ve tarama elektron mikroskop (SEM) incelemeleri ile karakterize edilmiştir. Artan SKSFS sıcaklığı ile birlikte, sinterleşme oranı da artmıştır. Bu durum, MMK_p malzemelerin ÇKD ve süneklik değerlerini belirgin oranda arttırmıştır. Bununla birlikte; B₄C takviye oranındaki artışla ÇKD değerlerinde ve sünekliklerde azalma, sertlikte ise artış gözlenmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımı ve süneklik değeri, SKSFS uygulanan %5 B₄C içeren MMK_p malzemede belirlenmiştir. SKSFS işlemleri oluşan sıvı fazın B₄C-matris arayüzey bağını artırıcı olumlu etkileri görülmüştür.

Anahtar kelimeler

AA6061; B₄C; MMK_p; Süper katı üzeri sıvı faz sinterleme; Toz metalurjisi

The Effect of Super Solidus Liquid-Phase Sintering Processes on Properties of AA6061-B₄C MMC_p Materials

Abstract

AA6061 metal matrix composite (MMC_p) materials produced solid-state sintering was investigated. The pre-alloyed AA6061 powder was mixed with 0%, 5%, 10% and 15% by weight of the B₄C particle reinforcing element in Turbula for 45 minutes. Mixture powders were cold pressed at 350 MPa pressure and then subjected to a lubricant debinding process in an argon atmosphere at 400°C for 1 hour. Subsequently, solid-state sintering process was carried out at 560°C under argon atmosphere for 1 hour to produce MMC_p materials. These MMC_p materials were subjected to super solidus liquid-phase sintering (SLPS) for 1 hour at different temperatures of 610°C and 620°C. Microstructures and physical properties of MMC_p materials re-sintered by SLPS were characterized by current phases, hardness and density measurements, transverse rupture strength (TRS) tests and also scanning electron microscopy (SEM) investigations. The sintering rate increased with increasing SLPS temperature. This effect significantly increased the TRS and ductility values of MMC_p materials. However with increasing in B₄C reinforcement ratio, a decrease in TRS and ductility but an increase in hardness were observed. The highest TRS and ductility values were determined in MMC_p materials reinforced with 5 wt. % B₄C. The positive effect of the liquid phase created with SLPS processes was observed in increasing the binding of the B₄C-matrix interface.

Keywords

AA6061; B₄C; MMC_p; Super solidus liquid phase sintering; Powder metallurgy

1. Giriş

Mühendislik malzemelerinin geliştirme çalışmaları kapsamında metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler alanında yapılan hızla devam etmektedir. Geleneksel mühendislik malzemelerinin kullanım sıcaklıklarının üzerinde kullanılabilir ve daha yüksek özgül mukavemete sahip mühendislik malzemelerine duyulan ihtiyaç sebebiyle MMK malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemelerin yapı ve özelliklerini belirleyen üç önemli husus mevcuttur (Karabulut vd. 2013, Kalemtaş 2014). Bunlar matris malzemesi, takviye malzemesi ve ara yüzey bağıdır. Matrisin fonksiyonu, takviye elemanlarının bir arada tutulmasını ve yüklemeye esnasında malzeme yüzeyini mekanik hasarlanmalardan korumaktır (Yakut 2015). MMK'ların katı ve sıvı hal işlemleri uygulanarak birçok farklı yöntemlerle üretilmesi mümkündür. Bu üretim yöntemlerinin en önemlilerinden birisi toz metalürjisidir. Toz metalürjisi, metal veya seramik tozların üretimi ile bu tozların mekanik ve ısı etkileriyle birleştirilerek ürün haline getirilmesi işlemidir. Güçlü takviye-matris arayüzey reaksiyonunu önleyen ve matris-takviye arasındaki istenmeyen reaksiyonları en aza indiren nispeten düşük işlem sıcaklığı, nete yakın şekilli üretim ve matris içinde mümkün olduğunca homojen dağılımlı takviye içeriği en büyük avantajlardır (Şeçilmiş 2017, Asgharzadeh ve Simchi 2009, Güven 2011, Ayvaz 2014).

MMK'lar için çok sayıda metal esaslı mühendislik malzemeleri matris olarak kullanılabilir. Doğada bulunabilirliği, işleme kolaylığı, yüksek özgül dayanımı, yüksek korozyon direnci, ısı işleme uygulanabilirliği, sünekliliği gibi avantajlı özelliklerinden dolayı alüminyum alaşımları, matris malzemesi olarak en çok tercih edilenlerdendir. MMK'lar da takviye elemanı olarak ise Al_2O_3 , SiC, TiC, B_4C , TiB_2 gibi seramikler kullanılmaktadır. En çok tercih edilenler SiC, Al_2O_3 ve B_4C olmakla birlikte, B_4C takviyeli kompozitler üzerine yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır (Gökmeşe vd. 2013). B_4C , alüminyum alaşımı matrisli MMK malzemeler için önemli bir takviye malzemesidir. Yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve rijitlik gibi üstün mekanik özellikleriyle Al- B_4C kompozitleri, özellikle fren malzemeleri için kullanılmaya aday durumdadır (Kalemtaş 2014,

Çolak ve Turhan 2016, Karabulut vd. 2016, Gökçe vd. 2017, Toptan 2006). Bu kompozitlerin üretimindeki esas problem, metal matris ile takviye parçacıkları arasındaki düşük ıslatabilme etkisidir. Bununla birlikte toz metalürjisi yöntemiyle ara yüzey kinetiğinin kontrolü diğer sıvı faz yöntemlerine göre daha iyi bir şekilde sağlanabilmektedir (Nazik 2013). Arayüzey bağının güçlü olması uygulanan yükün matristen takviye elemanlarına aktarılmasını ve dağıtılmasını sağlar. Matris ile takviye arasında oluşacak arayüzey bağı üretim aşamalarından sinterleme sürecinde meydana gelir. Katı hal sinterleme ve süper katı üzeri sıvı faz sinterleme (SKSFS) süreçleriyle toz metalürjisi ile üretilen MMKp malzemelerin matris ve takviye arasında bağ oluşturulmasına çalışılır. SKSFS, ön alaşımlı tozların solidus ve liquidus sıcaklıkları arasında bir sıvı faz sinterleme çeşididir. SKSFS ile matrisin takviye parçacıklarını iyi ıslatması durumunda güçlü bir arayüzey bağı oluşabilir (German 2007, Karabulut 2011, Momeni vd. 2011). Artan sıcaklıkla birlikte sıvı faz oluşumu artarken aynı zamanda sıvı fazın viskozitesi azalır yani ıslatabilirliği artmış olur. Sıvı faz sinterleme de genel amaç, matris ile takviye arasında güçlü bağ oluşumunu sağlayarak mekanik özellikleri arttırmaktır. Bu yüzden yapılan çalışmalarda katı hal sinterleme de parçacıkların yüzeyindeki oksit tabakanın bozulmadığı bu yüzden sıvı faz sinterleme ile oksit tabakanın bozulmasını ve yeterli ıslatmayı sağlayarak hem parçacıkların arasındaki hem de matris ve takviye arasındaki arayüzey bağını güçlendirdiği bilinmektedir (Martin and Castro 2003, Paidpili *et al.* 2017). Bu süreçte oluşan sıvı fazın oranı, Toz metalürjisi (TM) yöntemiyle şekillendirilen kompozitin biçimini bozmamalıdır.

AA6061 alaşımı çok iyi dayanım/tokluk kombinasyonu ile birlikte korozyon direnci sağlamaktadır (Ağacan 2013). Temel alaşım elementleri olarak Mg ve Si içeren ve tipik bir ekstrüzyon alaşımı olan AA6061, MMK'lar için matris olarak uygun bir alaşımdır. AA6xxx alaşımlarındaki çökelti işlemleri, Cu içeren AA2xxx alaşımlarından daha karmaşıktır, zira yarı kararlı fazların oluşumu hem Mg hem de Si'nin difüzyonunu gerektirir (Chen *et al.* 1998).

Bu çalışmada, ön alaşımlı AA6061 tozu ile B₄C seramik tozu katı hal sinterlemesi ile üretilen MMK_p malzemelerin mekanik özelliklerini artırmak amaçlı uygulanan süper katı üzeri sıvı faz sinterleme işlemlerinin matrisin sinterleşme etkisine, matris-B₄C parçacık arayüzey bağına, mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and method)

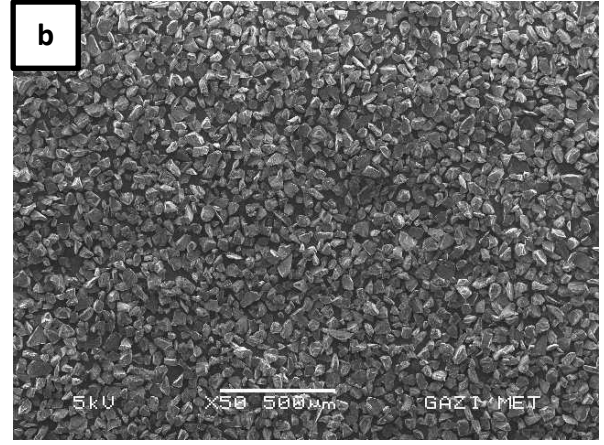
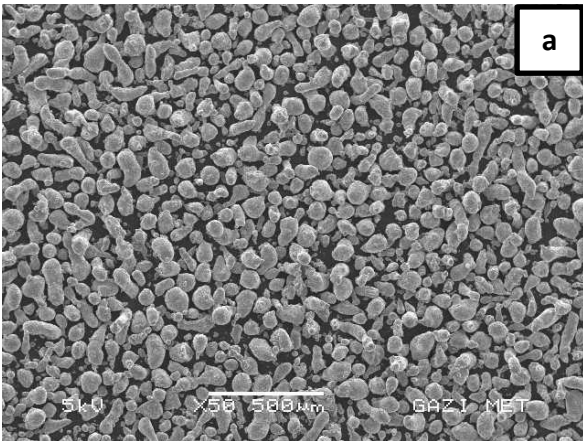
2.1. Malzeme (Material)

Deneysel çalışmalarda, atomizasyon yöntemiyle üretilmiş 170 µm altı AA6061 metal tozları (D₅₀-72.7 µm) ile %99 saflıkta 100 µm altı B₄C tozlarının (D₅₀-50 µm) %0, %5, %10 ve %15 oranlarında katı ve sıvı faz sinterlenmesiyle üretilen MMK_p malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan Al6061 tozu "Beijing Xing Rong Yuan Technology Company, China" firmasından tedarik edilmiş olup kimyasal kompozisyonu Çizelge1'de verilmiştir.

Çizelge 1. AA6061 metal tozunun kimyasal kompozisyonu (%Ağırlıkça) (Chemical composition of AA6061 metal powder (wt.-%)).

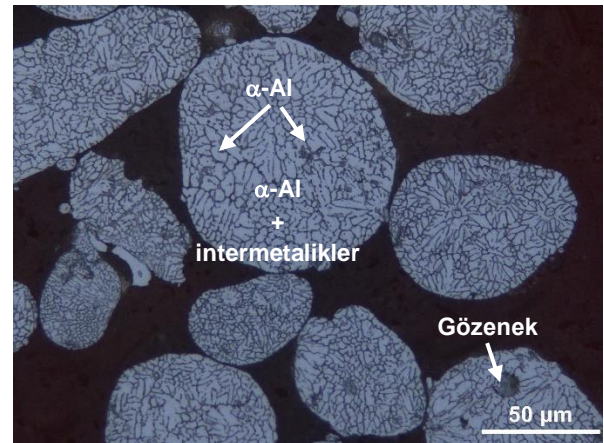
Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Al
0,5	0,8	0,1	0,5	1	0,25	0,25	0,1	Kal.

Şekil 1a'daki SEM görüntüsünde AA6061 parçacıkların farklı boyutlarda ve genellikle yuvarlak formda olduğu, B₄C (Şekil 1b) parçacıklarının ise farklı boyutlarda ve genellikle keskin köşeli olduğu görülmektedir.



Şekil 1. (a) AA6061 tozu (AA6061 powder) ve (b) B₄C tozu (B₄C powder)

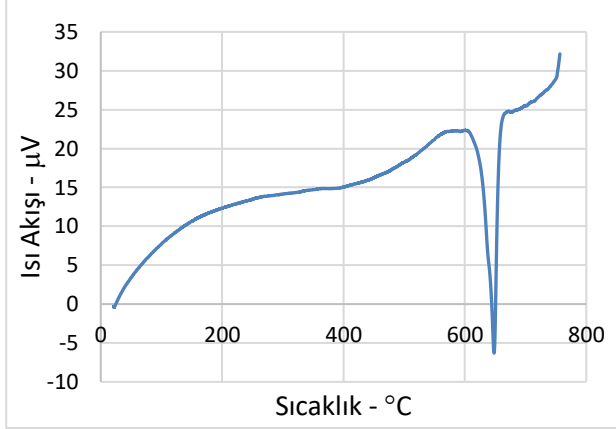
Şekil 2'de işlem görmemiş AA6061 tozlarının Keller çözeltisi ile dağlama sonrası optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, başlangıç AA6061 parçacıkların mikroyapısında yer yer muhtemelen katılaşma sürecinde oluşmuş mikro gözenekler ve birkaç mikronluk α-Al dentritleri (beyaz) arasında segregasyon olan alaşım elementlerinin (Mg, Si, Cu, Fe vb.) oluşturduğu çökelmiş intermetalik fazlar gözükmemektedir. Daha küçük parçacıklar genellikle daha ince katılaşma mikroyapısı göstermiştir. Couper ve Parson (2008) ile Tomiczek'in (2015) belirttiğine göre muhtemelen bu intermetalikler, atomizasyon sırasında hızlı soğuma ile oluşan Al₁₂Fe₃Si, Al₈Fe₂Si, Al₁₅Fe₃Si₂ veya Al₅FeSi grubu fazlardır.



Şekil 2. AA6061 parçacıkların Keller ile dağlanmış başlangıç mikroyapısı (Initial microstructure of AA6061 particles etched with Kellers)

Şekil 3'de verilen DTA (Differential Thermal Analysis) analizinden AA6061 metal tozunun ergimeye başlama sıcaklığının 606°C civarında olduğu

görülmektedir. Ergimenin tamamlandığı sıcaklık ise yaklaşık 648°C olarak belirlenmiştir. Al-Mg₂Si faz diyagramında bu sıcaklık aralığı dikkate alınarak alaşımın, 610°C'deki sinterleme işlemi sonucunda yaklaşık %1 oranında, 620°C'deki sinterleme işleminde ise %3 civarında sıvı faz içereceği belirlenmiştir.



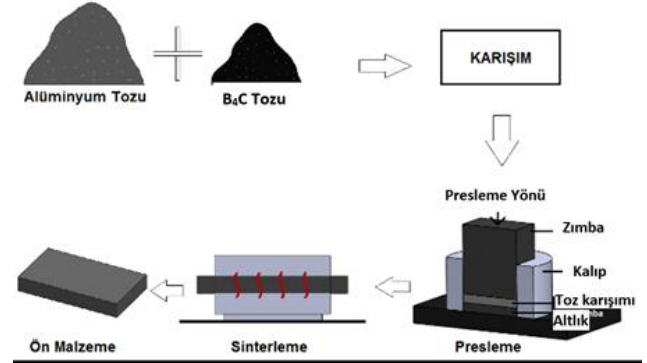
Şekil 3. AA6061 metal tozunun DTA analizi (DTA analysis of AA6061 metal powder)

2.2. Metot (Method)

Matris ve takviye tozların parçacık boyut ölçümleri, Malvern Instruments marka Mastersizer 3000 model lazer parçacık ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Sıvı atomizasyon metoduyla üretilmiş ön alaşımlı AA6061 metal tozları ile ağırlıkça %5, %10 ve %15 B4C karışım tozları 45 dakika süreyle turbula cihazında ön karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırılan tozlar, özel olarak hazırlanan toz şarj hunisi vasıtasıyla 40x60 mm'lik ölçülerdeki bir kalıp boşluğuna doldurulmuştur. Daha sonra, oda sıcaklığında 350 MPa basınç altında tek yönlü soğuk preslenerek, 40x60x7 mm³ hacimli, dikdörtgen prizma şeklinde toz metal (T/M) ve MMK_p malzemeler üretilmiştir. T/M ve MMK_p malzemelerin üretim süreci Şekil 4'de açıklanmıştır.

B₄C takviyelerine bağlı olarak takviyesiz T/M (%0 B₄C), ağırlıkça %5, %10 ve %15 B₄C takviye içeren malzemeler sırasıyla 5, 10 ve 15 sayıları ile kodlanmıştır. Numuneler yağlayıcı giderme işlemi için Protherm marka atmosfer kontrollü yatay tüp fırınına paslanmaz bir çelik altlık ile fırın içerisinde argon gazı ortamında 400±5°C de 1 saat

bekletilmiştir. Fırın içinden argon gazı çıkışı sağlanarak yağlayıcının ortamdaki uzaklaştırılması sağlanmıştır. Yağlayıcı giderme işleminin devamında, aynı ortamda 560±5°C katı hal sinterleme (KHS) işlemi uygulanmıştır. Sinterlenen numuneler fırında kendi halinde soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 4. MMK_p malzeme üretiminin akış şeması (Flow chart of MMK_p material production)

Katı hal sinterleme sonrası T/M ve MMK_p malzemeler Mitsubishi Electric marka CNC tel erozyon tezgahında kesilerek dilimlenmiş ve 13x31x7 mm³ ve 13x9x7 mm³ boyutlarında test blok numuneleri elde edilmiştir. Bu numunelerin bir kısmına, Protherm marka düşey tüp fırınında (Şekil 5) 610±1°C ve 620±1°C sıcaklıklarda bir saat süre ile SKSFS işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerin sonunda numuneler, suda (hızlı) ve fırın (yavaş) soğutulmuştur. T/M ve MMK_p numunelerin yoğunluk ölçümleri, Arşimet prensibine göre çalışan, 0,0001 g hassasiyetteki, üzerinde yoğunluk kiti bulunan Sartorius marka dijital terazide yapılmıştır.



Şekil 5. SKSFS işlemi deney düzeneği (SLPS process test setup)

Numunelerin Brinell sertlik ölçümleri, Emcotest DuraVision 200 model sertlik ölçüm cihazında 2,5 mm çapında tungsten bilye ve 31,25 kgf yük ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri numunelerin presleme doğrultusuna paralel yüzeylerinden yapılmıştır.

ASTM B 312 (ASTM B 312. 1996) standardına uygun hazırlanan numuneler Instron marka, maksimum 50 kN kapasiteli, bilgisayar kontrollü çekme cihazında, Çapraz Kırılma Dayanımı (ÇKD) deneyine tabi tutulmuştur. Deney yükleme hızı ve maksimum yükleme miktarı ASTM B 528-16 (ASTM B 528-16. 2008) standardı referans alınarak belirlenmiştir. Çapraz kırılma deneyi sonrası numunelerin kırık yüzeyleri, taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

Numunelerin çapraz kırılma dayanımları ASTM B 528-16 (ASTM B 528-16. 2008) standardında yer alan ve aşağıda yer verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\text{ÇKD} = \frac{3.P.L}{2.t^2.W} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

P: Deney parçasının kırıldığı andaki yük(N)
L: Destekler arası uzaklık (25,4 ±0,3mm)
t: Deney parçasının kalınlığı (6,35±0,13mm)
W: Deney parçasının genişliği (12,7±0,13mm)
Y: Eğilme şekil değişim miktarı (mm)
ÇKD: Çapraz kırılma dayanımı (MPa)

ÇKD % süneklik değerleri aşağıda yer alan formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{ÇKD \% Sünekliği} = \frac{P.L^3}{4.Y.t^3.W} \quad (2)$$

SKSFS işlemi uygulanan numunelerin kodlaması aşağıdaki gibidir;

KHS: Katı hal sinterleme

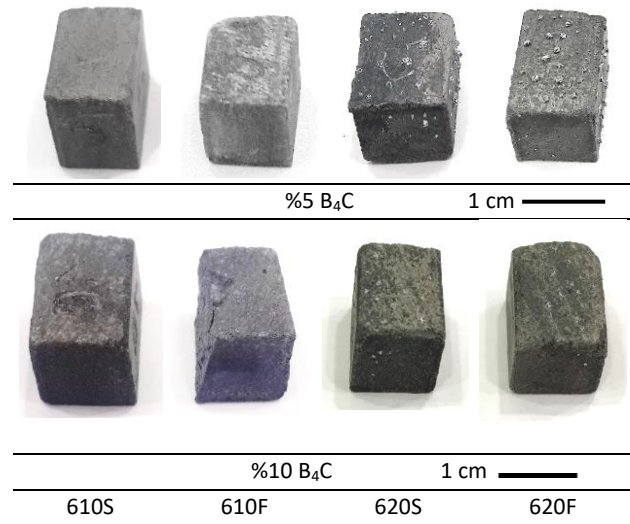
610S ve 610F: 610°C'de SKSFS işlemi sonrası sırasıyla suda ve fırında soğutma.

620S ve 620F:620°C'de SKSFS işlemi sonrası sırasıyla suda ve fırında soğutma.

3. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

3.1. T/M ve MMKp numunelerin makro analizi (Macro analysis of P/M and MMCp samples)

SKSFS işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde, sinter sürecinde oluşan sıvı fazın kapiler etkiyle ve/veya gaz fazın etkisiyle numune yüzeyine çıkması (kuma) sonucu oluşan milimetrik boyutlarda küresel katılar gözlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, 620°C'de SKSFS uygulanan numunelerdeki kuma oranı 610°C'deki numunelere göre çok daha fazladır. Ayrıca, azalan soğuma hızıyla (fırında soğutma) birlikte kuma oranının ve boyutlarının arttığı görülmektedir. 610°C'de %1 civarında, 620°C'de ise %3 civarında sıvı faz olduğu göz önüne alındığında, düşük sıcaklıklardaki numunelerde makro düzeyde sıvı kuma olmaması normal görülebilir. Fakat artan sinter sıcaklığıyla birlikte numune yüzeyine yakın bölgelerde oluşan sıvı fazın, katı faz parçacıklar arası boşluklarda kapiler (kılcal) kuvvet etkisiyle numune yüzeyine taşındığı görülmektedir (Gökçe 2020, German 2014). Bu durum %10 B₄C'li MMKp malzemede kısmen, ancak %5 B₄C malzemede daha belirgin oranda meydana gelmiştir (Şekil 6). Farklı sinterleme sıcaklıklarında oluşan bu fiziksel değişimler, numune boyutlarında belirgin hacimsel bir değişkenlik meydana getirmemiştir.

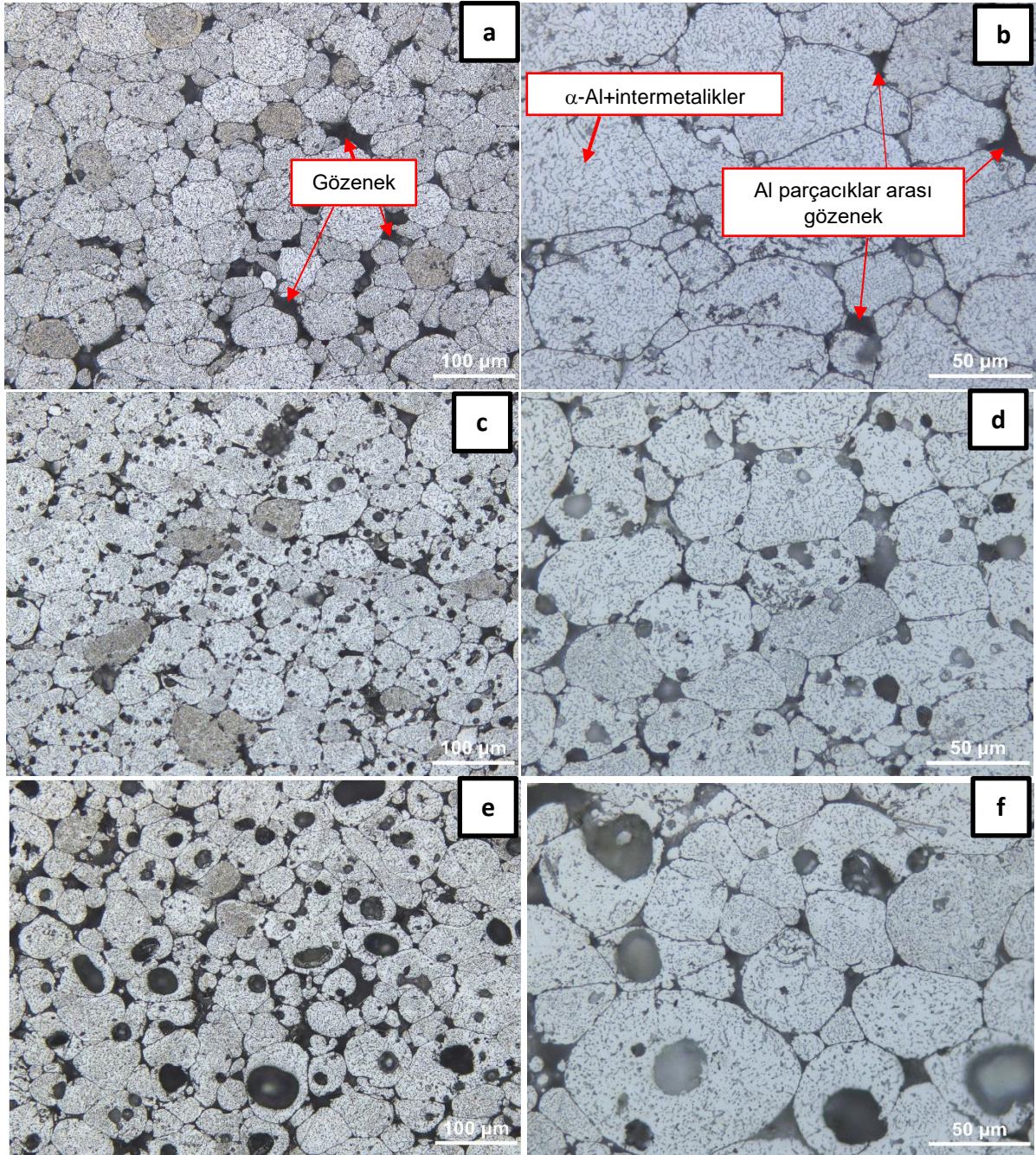


Şekil 6. SKSFS uygulanan MMK_p numunelerin makro görünüşleri (Macro views of MMC_p samples applied SLPS)

KHS ve SKSFS işlemleri uygulanan T/M ve MMK_p numunelerin mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 7'deki mikroyapı fotoğraflarında dikkat çeken husus, AA6061 tozunun presleme ve KHS işlemleri sonrasında yeter yoğunlukta bir kompakt malzeme üretilmemesidir.

Şekil 7a'daki mikroyapı görüntüsü incelendiğinde AA6061 parçacıklar arasındaki gözenek yoğunluğu açıkça görülmektedir. Şekil 7b'de gösterilen AA6061 alaşımı toz parçacıklarının mikroyapısında, α -Al fazi dentrit sınırlarında segregasyon olmuş koyu gri tonlamalı çubuksu formdaki çeşitli intermetalik bileşikler görülmektedir (Couper and Parson 2008, Tomiczek 2015, Tong *et al.* 2018). Tozların üretiminde ve/veya saklanma koşullarında yüzeylerinde zamanla oluşan yoğun oksit (Al_2O_3) tabakasının presleme sürecindeki yetersiz sıkıştırma ve deformasyon

etkileriyle kırılmaması sinterleşmeye engel olabilmektedir. Şekil 7a ve b'deki mikroyapı görüntülerinde sinterleşme problemi ve parçacık arayüzeyleri görülebilmektedir. Arık vd. (2017), Paidpilli (2017) ve Martin'in (2003), çalışmalarında benzer durumları rapor edilmiştir. Bu durumda, AA6061 tozun presleme sürecinde daha yüksek sıkıştırma basınçlarının kullanılması sinterleşme etkisini artırmak bakımından uygun olabilir.



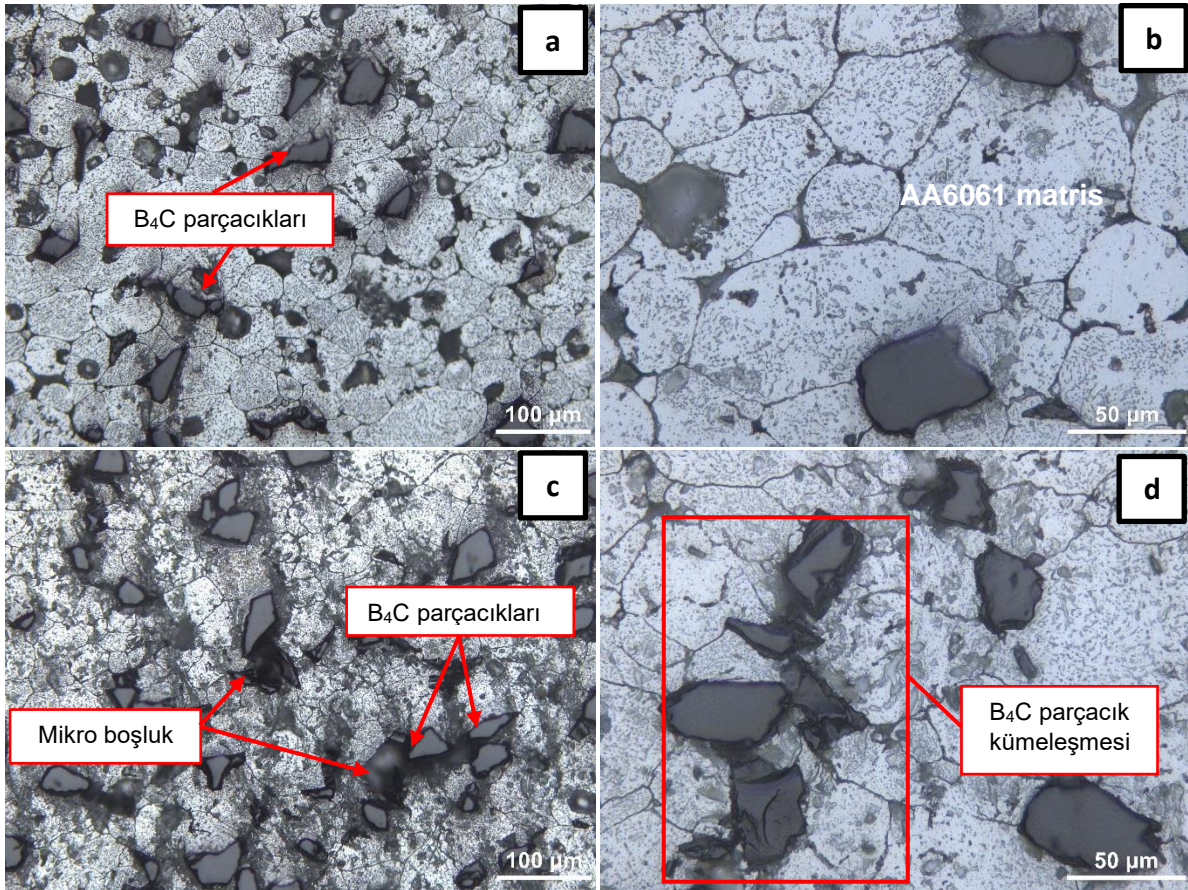
Şekil 7. a,b) Katı Hal Sinterleme c,d) 610°C ve e,f) 620°C'de SKSFS sonrası fırında soğuyan T/M malzemeler (a,b) Solid State Sintering, c,d) 610°C and e,f) P/M materials cooled in the furnace after SLPS at 620°C)

610 °C ve 620°C'de SKSFS işlemi uygulanan T/M malzemesinin mikroyapısı incelendiğinde (Şekil 7c,d ve e,f) dikkat çeken husus ise, parçacıklar arasındaki gözenekliliğin kısmen azalmasına rağmen parçacıklar/tane içindeki gözeneklerin varlığıdır. AA6061 alaşımı toz parçacıkları içindeki alaşım elementlerinin segregasyonu sebebiyle SKSFS işlemi sırasında oluşan ötektik bileşimce zengin sıvıdan kaynaklandığı düşünülen bu mikro gözenekler Şekil 7c,d ve e,f'de görülmektedir. Artan sıvı faz sinter sıcaklığıyla (620°C) birlikte özellikle fırında soğuyan numunelerde bu gözeneklerin boyutları da artmıştır. Parçacıklarda oluşan sıvı fazın kapiler kuvvet etkisiyle dış yüzeye taşınımı ve/veya parçacıklar arası boşluklara yayınımla gözeneklerin oluşması muhtemeldir. Özellikle yüksek sıcaklıkta ve fırında yavaş soğuyan numune mikroyapısında bu tür gözeneklerin ve yüzeydeki kuma oranının artması (Şekil 7e ve f'de gösterilmiştir) bu varsayımı güçlendirmektedir. Bununla birlikte, yeniden ergitme ile meydana gelen ötektik sıvının sebep olduğu bu tür parçacık içi gözeneklerin (yeniden

erime havuzları) oluşmasının yanında katılma sürecindeki Kirkendall etkisi de göz ardı edilmemelidir (Anyalebechi 1994, Shim *et al.* 2011).

610°C'de sinterlenen numunelerde soğutma ortamındaki değişikliğin gözenek oranına belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Suda ve fırında soğuyan numunelerin gözenek yoğunlukları benzer görünmektedir.

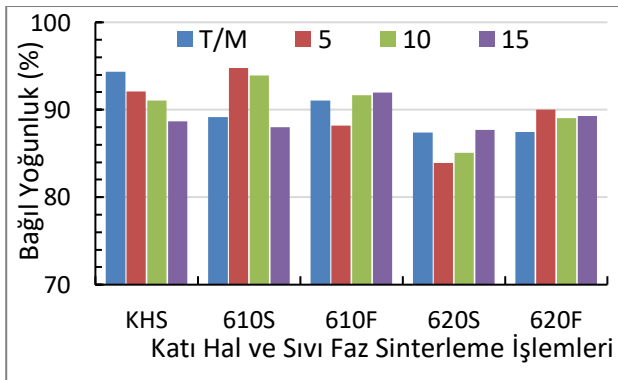
Şekil 8a ve b'de 620°C'de SKSFS sonrası suda soğuyan %5 B₄C'li MMK malzemelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, matris ve takviye parçacıklar arasındaki arayüzey bağının 620°C'de SKSFS sonrası suda soğuyan ve %15 B₄C'li (Şekil 8c,d) MMK malzemelerden nispeten daha iyi olduğu görülebilir. B₄C takviye oranının artmasıyla oluşan takviye parçacıklar arası mikroboşluklar tespit edilmiştir (Şekil 8c). Zira, B₄C parçacıklarının yoğun olduğu bölgelerde kümeleşmeden (topaklanma/aglomerasyon) kaynaklanan mikroboşluk kusurlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 8. 620°C'de SKSFS sonrası suda soğuyan MMK malzemeler, a,b) %5 B₄C ve c,d) %15 B₄C'li (MMC materials cooled in water after SLPS at 620°C, a,b) 5% B₄C and c,d)15% B₄C)

3.2. Yoğunluk değişimi (Density variation)

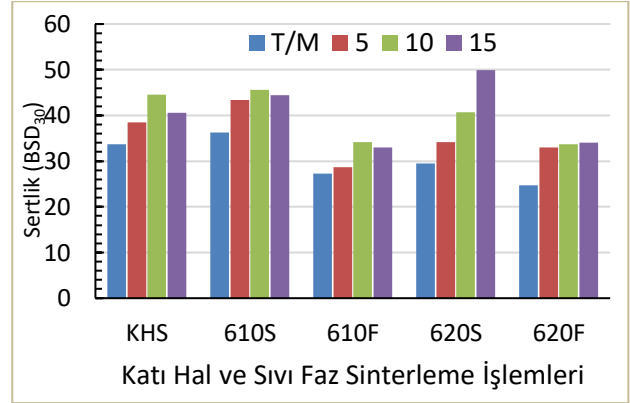
T/M ve MMK_p malzemelerin, Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluğunun teorik yoğunluğa oranlanmasıyla elde edilen % bağıl yoğunluk değerlerine ilişkin sonuçlar Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde KHS uygulanan MMK_p malzemelerin artan takviye miktarıyla birlikte yoğunluk değerlerinde lineer bir düşüş olduğu görülmektedir. Takviye oranındaki artışla birlikte yapı içerisinde homojen karışımın sağlanamaması sonucu B₄C bölgesel kümeleşmesinin arttığı ve buna bağlı olarak mikro boşlukların arttığı söylenebilir (Ekici vd. 2016). Bununla birlikte, sinterleme sıcaklıkları ve soğutma hızlarındaki değişkenliğin yanında, değişen takviye miktarıyla birlikte numunelerin yoğunluk değerlerinin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Gerek kullanılan matris malzemesinin sinterleşme de gösterdiği olumsuzluklar ve gerekse sıvı faz sinterleme sırasında oluşan kısmi sıvı fazın matris malzemesi parçacıklarında meydana getirdiği gözenekler ve devamında yüzeye yayılan (kusan) sıvı fazın katılaşıp numunelerin hacmini arttırma etkileri dikkate alındığında, sinter sıcaklıkları ile yoğunluk değişimleri arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır. Zira artan sinter sıcaklığıyla beklenen yoğunluk artışının tersine, sıcaklıkla artan sıvı fazın yüzeye kusması yoğunluğu olumsuz etkilemiştir.



Şekil 9. KHS ve SKSFS işlemlerinin bağıl yoğunluğa etkisi (Effect of SSS and SLPS processes on relative density)

3.3. Sertlik değişimi (Hardness variation)

T/M ve MMK_p malzemelerin %B₄C takviye oranları ve sinterleme işlemlerine göre sertlik değişimleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Tüm numuneler içerisinde en yüksek sertlik değeri 620S malzemelerinden %15 B₄C takviyesi içeren kompozit numunesinde 50 HB30 olarak ölçülmüştür. 620F'de ise takviye oranı % 0 B₄C olan yani T/M numunesi 24,7 HB30 sertlik değeriyle en düşük sertliğe sahiptir.



Şekil 10. KHS ve SKSFS işlemlerinin sertliğe etkisi (Effect of SSS and SLPS processes on hardness)

Katı hal sinterleme yapılan malzemelerde genel olarak seramik takviye parçacık oranının artmasıyla sertlik değerindeki artış beklendiği gibidir. Bununla birlikte takviye oranındaki artışla B₄C parçacıklar arası mikroboşlukların ve sinterleşme problemlerinin artma eğiliminin sertlikte lineer artışa engel olduğu düşünülebilir. Bu malzemelere farklı sıcaklıklarda uygulanan sıvı faz sinterleme ve farklı soğutma hızlarının etkisi ise değişkendir.

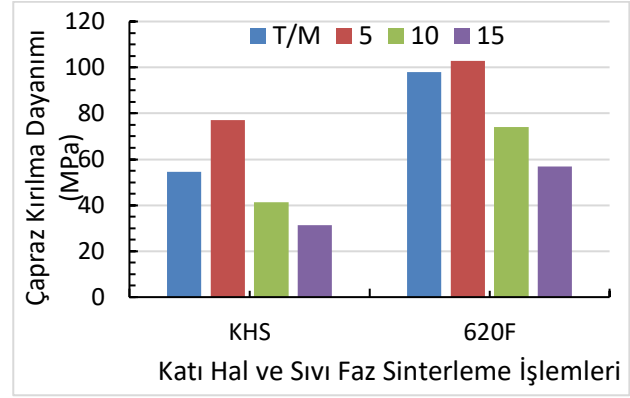
Genel olarak 610°C ve 620°C de sıvı faz sinterleme sonrası hızlı soğutma (suda) işleminin sertliğe olumlu etkisi açıkça görülmektedir. Ancak bu durum KHS sonrası 610S malzemelerinde ve özellikle 620S-%15B₄C numunede daha belirgindir. Sıvı faz sinterleme sonrası yavaş soğutma ile (fırında) sertlikte düşüşe ve hızlı soğutma ile sertlikte artışa sebep olan mekanizma, matris malzemesine bağlanabilir. Al-Mg₂Si ikilisine ait faz diyagram dikkate alındığında, AA6061 matris alaşımının Mg ve Si intermetalik bileşenlerinin düşük sıcaklıkta (610°C) alfa alüminyumdaki katı çözelti oranı yüksek sıcaklıktakinden daha fazla olacağı görülmektedir.

(Zhang *et al.* 2001, Amado and Daroqui 2015). Dolayısıyla ani soğutmadaki (su verme) aşırı doymuş katı çözültü etkisiyle matrisin sertliğindeki artışın 610S malzemelerinde daha belirgin olduğu söylenebilir. Fırında soğutma ile sinterleme işlemleri tamamlanan 610F ve 620F malzemelerinde düşük sertliğin sebebi ise yavaş soğuma ile sağlanan iri intermetalik çökelti olduğu düşünülebilir (Dan vd. 1983, İpekoğlu vd. 2018, Matik ve Tanattı 2017). Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta sıvı faz sinterleme sırasında sinterleşme oranı ve takviye parçacık-matris arayüzey bağının artmasıyla da sertlikte kazanım sağlanabilir.

3.4. Çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) ve süneklik (Transverse rupture strength (TRS) and ductility)

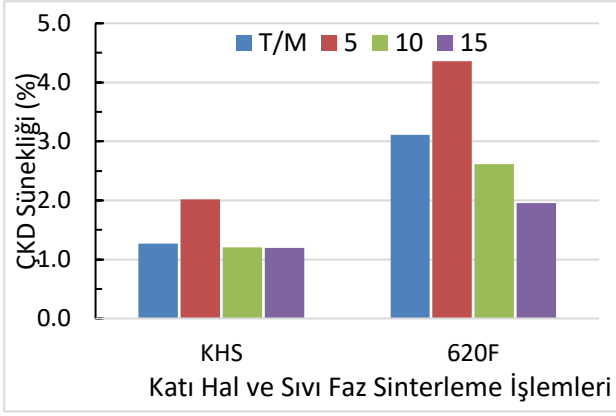
KHS ve 620°C'de SKSFS ve fırında soğutma (620F) işlemlerine ait T/M ve MMK_p malzemelerin ÇKD değerleri B₄C takviye oranlarına bağlı olarak Şekil 11'de gösterilmiştir. KHS verilerine göre takviye oranının artmasıyla değerlerde önce artış daha sonra azalma gözlenmiştir. %5 B₄C takviye elamanı içeren kompozit numunesinin ÇKD değeri en yüksek (77MPa) iken, %15 B₄C takviye elamanı içeren kompozit numunesinin ÇKD değeri en düşüktür (31MPa). 620F işlemlerinde ise, T/M ve %5 B₄C takviye elamanı içeren kompozit numunesinin ÇKD değerlerinin yüksek, %15 B₄C takviye elamanı içerenin ise düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte KHS işlemlerine uygulanan sıvı faz sinterleme işleminin çapraz kırılma dayanımlarını yaklaşık %80 oranında artırdığı söylenebilir. Ancak takviye oranındaki artışla birlikte kompozit malzemelerin süneklik ve dayanımlarında azalma belirlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucu elde edilen değerlendirmelerde belirtildiği gibi, takviye oranının artmasıyla homojen karışımın sağlanamaması sonucu B₄C kümeleşmesinin (Şekil 8c ve 8d) oluşturduğu gözenek ve B₄C parçacıkları arası mikroboşlukların ÇKD değerlerinin azalttığı söylenebilir. Zira, toz metal malzemelerdeki gözenek oranının mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir (German 2007). Sinterleşme problemlerinin yanında, B₄C parçacıklarının keskin köşeli geometrisinin de

kompozit yapının ÇKD değerlerine olumsuz etkisi göz ardı edilmemelidir.



Şekil 11. KHS ve 620°C'de SKSFS sonrası fırında soğutma işleminin ÇKD değerlerine etkisi (The effects of SSS sintering and furnace cooling process after at 620°C SLPS on the TRS values)

Şekil 12'de malzemelerin ÇKD deneyi ile elde edilen sünekliklerindeki değişim gösterilmiştir. Burada, çapraz kırılma deneyi sürecindeki eğilme davranışına bağlı belirlenen en düşük sünekliğin KHS uygulanmış malzemelerde ve genel olarak %1 civarında olduğu görülmektedir. Sadece KHS-%5B₄C takviyeli MMK_p malzemenin eğilme kırılmasındaki sünekliği %2 civarındadır. Bu değerler, neredeyse hiç sünek davranış göstermeksizin yani plastik deformasyon gerçekleşmeksizin gevrek kırılma davranışını göstermektedir. Ancak bu malzemelere, 620°C'de sıvı faz sinterleme ve devamında fırında soğutma işlemi uygulanmasıyla birlikte sünekliklerinde iki katına kadar artış sağlanmıştır. Bu sayede en yüksek süneklik 620F-%5B₄C malzemesi için %4'ün üzerine çıkmıştır. SKSFS işlemi ile artırılan sünekliğe rağmen genel olarak halen sünekliğin çok düşük olduğu söylenebilir. Aslında 620F işleminin malzemelerin ÇKD değerlerindeki artışla ilişkili olarak sünekliklerini de artırmış olduğu görülmektedir. Dolayısı ile her iki özelliğin en yüksek olduğu 620F-%5 malzemesi için, gerek matris sinterleşmesinin ve gerekse matris-takviye parçacık arayüzey bağının diğerlerinden çok daha yüksek olduğu söylenebilir.



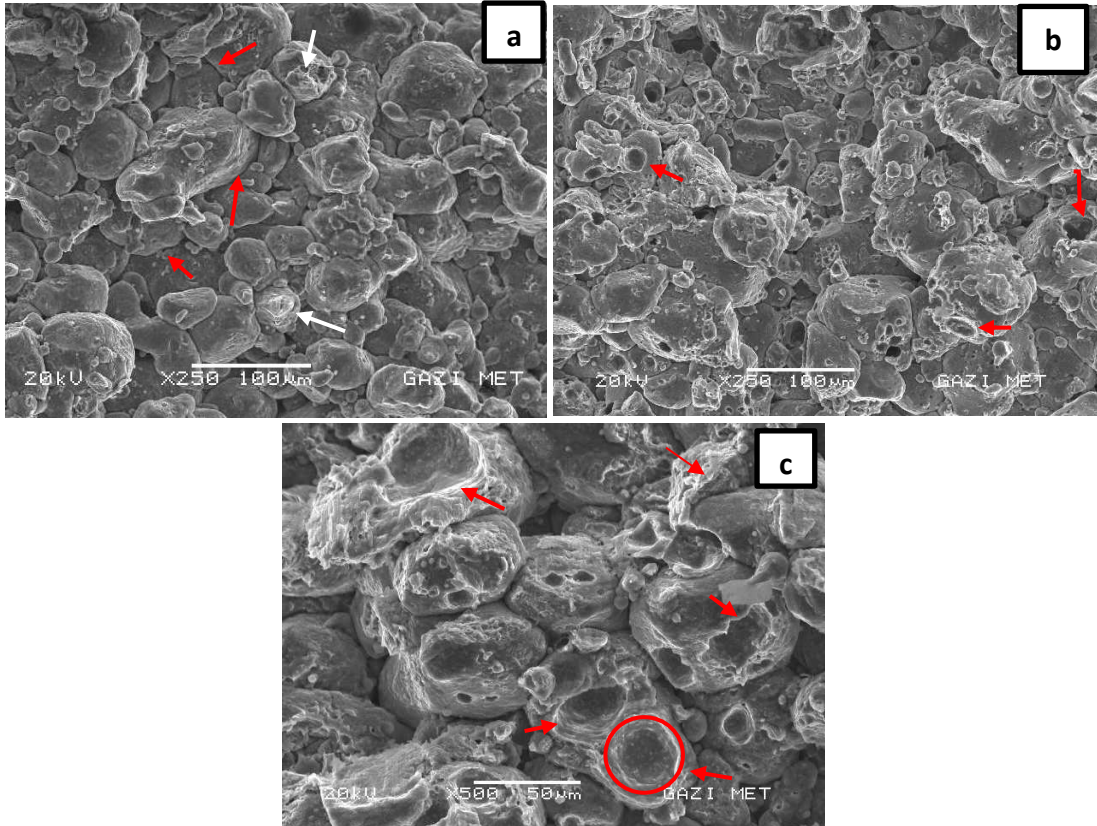
Şekil 12. KHS ve 620°C'de SKSFS sonrası fırında soğutma işleminin ÇKD sünekliğine etkisi (The effects of SSS sintering and furnace cooling process after at 620°C SLPS on ductility)

3.5. Kırık yüzey incelemeleri (Fractured surface investigations)

Şekil 13'de KHS ve 620°C'de SKSFS devamında fırında soğuyan T/M numunelerin çapraz kırılma deneyi sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 13a 'da AA6061 matris parçacıkları arası sinterleşme problemleri açıkça görülmektedir.

Bu parçacıkların Şekil 2a'da verilen başlangıç parçacıkların biçimleri ile benzerlikleri dikkat çekicidir. Kırılma sürecinde, belirgin bir sünek kırılma formu oluşmadan matris parçacıkları arayüzeylerinden ayrılmalar (kırmızı oklarla gösterildi) olmuştur. Yalnızca birkaç parçacıkta sünek kırılma davranışı gösteren plastik deformasyon izleri (beyaz oklarla gösterildi) belirlenmiştir. Bu durum, KHS ile üretilen T/M malzemelerde önemli oranda sinterleşme problemi olduğunu göstermektedir. Bu malzemelere 620°C'de SKSFS ve fırında soğutma işlemi uygulandığında ise sinterleşme oranının artmış olduğu Şekil 13b ve c'deki kırık yüzey SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

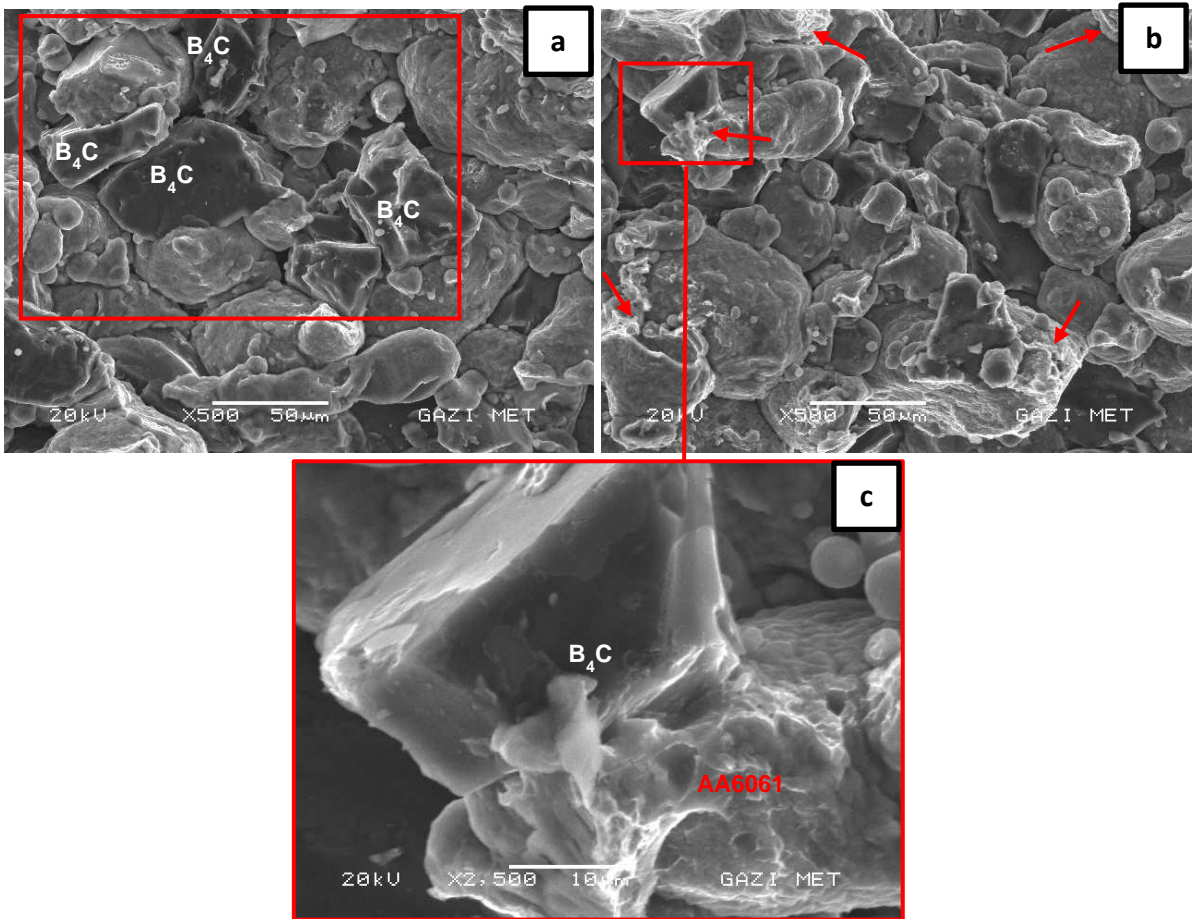
Kırmızı oklarla işaretlenen farklı boyutlardaki çukurcuk (çanak) oluşumları, kırılma sürecinde meydana gelen plastik deformasyonu göstermektedir. Çanak içerisinde gözükten ve yaklaşık 1 µm boyutlarındaki açık renkli parçacıklar ise intermetalik çökeltilerdir (Şekil 13c'de kırmızı daire içinde gösterildi). SKSFS sinterleme sürecinde



Şekil 13. Çapraz kırılma deneyi sonrası T/M numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri; a) KHS ve b,c) 620°C'de SKSFS ve fırında soğutma (SEM images of broken surfaces of P/M samples fractured by TRS test; a) SSS and b,c) SLPS at 620°C and then cooling in furnace)

oluşan ilk sıvı fazın, ergime sıcaklığı düşük ötektik bileşimin zengin olduğu bölgelerde meydana geldiği bilinmektedir (Barber 2004). SKSFS işlemleri sonunda AA6061 alaşımı parçacıklar içinde oluşan sıvı faz gözenekleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Dolayısıyla kırık yüzeylerde görülen çukurcukların, Şekil 7’de tanımlanan gözeneklerde başlayan kırılma süreci sonunda oluştuğu söylenebilir. Zira Şekil 13c’de verilen kırık yüzeyin topoğrafyasındaki AA6061 parçacıkların gözenek çeperlerinden (duvarlarından) çekme deformasyonu ile uzayarak ayrılmış ve ince çeperli çukurcuk oluşturmuş hali bu durumu doğrulamaktadır.

Şekil 14’de KHS ve 620°C’de SKSFS sonrası fırında soğutma uygulanan MMK_p malzemelerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 14a görüntüleri incelendiğinde AA6061 matris parçacıkları arasındaki sinterleşme problemlerinin yanında, matris - B₄C parçacık arayüzeyinde de belirgin KHS problemleri mevcuttur. Ayrıca, artan takviye oranı ile birlikte oluşan B₄C kümeleşmesi sebebiyle takviye parçacıkları arasındaki boşlukların da (kırmızı çerçeve içinde gösterilmiştir) ÇKD ve süneklik değerlerini düşürme etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 14. %15 B₄C takviyeli MMK_p malzemenin kırık yüzey SEM görüntüleri; a) KHS ve b,c,) SKSFS-620F (Fractured surface SEM images of 15% B₄C reinforced MMK_p material; a) SSS and b,c) SLPS-620F)

Şekil 14b ve c’de gösterilen 620°C’de SKSFS uygulanmış %15 B₄C takviyeli MMK_p malzemelerde ise, AA6061 matris parçacıkları arasındaki kısmi sıvı faz sinterleşme etkisini gösteren ve sünek kırılmayı temsil eden kırık yüzey görünüşleri mevcuttur (Şekil 14b’de kırmızı oklarla gösterildi). Bununla birlikte, yer yer B₄C parçacık-matris arası sıvı faz iletmesiyle arayüzey bağı oluşmuş şekilde kırık

yüzey formları da belirlenmiştir (Şekil 14b’de kırmızı çerçeve içinde ve Şekil 14c’de daha yüksek büyütme oranında gösterildi). Dolayısıyla, MMK_p malzemelerin çapraz kırılma dayanımları ve sünekliklerindeki belirgin artışa, sıvı faz sinterlemenin bahsedilen olumlu etkileriyle katkı sağlandığı söylenebilir.

4. Sonuçlar

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ve katı hal sinterleme işlemi uygulanan AA6061 matrisli B4C takviyeli MMKp malzemelerin özelliklerine süper katı üzeri sıvı faz sinterleme işlemlerinin etkisi konusunda yapılan bu çalışmanın genel sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- SKSFS işlemleri sonunda tozmetal (T/M) ve MMKp malzemeler genel olarak geometrilerini korumuşlar, makro düzeyde gözle muayenede herhangi bir çekme veya çökme deformasyonu gözlenmemiştir. Ancak, numune yüzeylerinde, sinter sürecinde oluşan sıvı fazın numune yüzeylerine çıkması (kuma) sonucu oluşan kürecikler şeklinde katılmış kusurlar gözlenmiştir. Genel olarak, artan sıvı faz sinterleme sıcaklığıyla birlikte kuma oranı da artmıştır.

- 610 °C ve 620°C’de sıvı faz sinterleme işlemi uygulanan T/M malzemesinin mikroyapısında, parçacıklar arasındaki gözenekliliğin kısmen azalmasına rağmen, parçacıklar/taneler içinde yeni gözenekler oluşmuştur. Artan sıvı faz sinter sıcaklığıyla (620°C) birlikte özellikle fırında soğuyan numunelerde bu gözeneklerin boyutları da artmıştır.

- B₄C takviye oranının artmasıyla birlikte, takviye parçacıkların yoğun olduğu bölgelerde kümeleşmeden (aglomerasyon) kaynaklanan parçacıklar arası mikroboşlukların oranı da artmıştır. Bu durum, KHS uygulanan MMK_p malzemelerin yoğunluk değerlerinde lineer bir düşüşe sebep olmuştur.

- Gerek matris malzemesinin sinterleşme problemleri ve gerekse sıvı faz sinterleme sırasında oluşan sıvının meydana getirdiği gözenekler ve devamında yüzeye yayılan (kusan) sıvı fazın katılarak numunelerin hacmini arttırma etkileri dikkate alındığında, sıvı faz sinter sıcaklıkları ile MMKp malzemelerin yoğunluk değişimleri arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.

- Katı hal sinterleme yapılan malzemelerde genel olarak seramik takviye parçacık oranının artmasıyla sertlik değerindeki artış görülmüştür. Bununla birlikte takviye oranındaki artışla B₄C parçacıklar arası mikro boşlukların ve sinterleşme

problemlerinin artma eğiliminin sertlikte lineer artışa engel olduğu söylenebilir. Sıvı faz sinterleme sonrası hızlı soğutma (suda) işleminin sertliğe olumlu etkisi açıkça görülmüştür.

- Katı hal sinterleme ile üretilen MMK_p malzemelerde artan takviye oranı ile birlikte çapraz kırılma dayanımları ve süneklikleri de azalmıştır. Ancak bu malzemelere uygulanan sıvı faz sinterleme işlemleri ile çapraz kırılma dayanımları ve süneklikleri yaklaşık %80 oranında artmıştır.

- Kırık yüzey incelemelerinden, KHS uygulanan malzemelerdeki sinterleşme problemleri görülmüştür. Ancak sıvı faz sinterleme işlemi ile matris parçacıkları arasında kısmi sinterleşmeler sonucu sünek kırılma etkileri artmıştır. İlave olarak, matris-B₄C parçacıkları arasında da kısmi sıvı faz ile oluşmuş arayüzey bağı da belirlenmiştir.

Kaynaklar

Ağacan, B., 2013. Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozitlerde atık Al talaşların değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 124.

Amado, M.N. and Daroqui, F., 2015. "Revision of the solvus limit of Al-Mg₂Si pseudo binary phase diagram". *Procedia Materials Science*, **8**, 1079-1088.

American Society for Testing and Materials (ASTM), 1996. ASTM B 312. Standard Test Method for Green Strength for Compacted Metal Powder Specimens, ASTM, 02.05; 80–91.

American Society for Testing and Materials (ASTM), 2008. ASTM B 528-16. Standard Test Method for Transverse Rupture Strength of Metal Powder Specimens, ASTM, 02.05, 1-3.

Anyalebechi, P., and Hogarth J., 1994. Effect of supereutectic homogenization on incidence of porosity in aluminum alloy 2014 ingot. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **25**(1), 111-122.

Arık, H., Kırmızı, G., ve Semerci, P., 2017. Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al₂O₃ takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve abrasif aşınma davranışının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, **5**(4), 87-97.

- Asgharzadeh, H., and Simchi, A., 2009. Supersolidus liquid phase sintering of Al6061/SiC metal matrix composites. *Powder Metallurgy*, **52**(1), 28-35.
- Ayvaz, M., ve Çetinel, H., 2014. Farklı matris kompozisyonları ve takviye oranları için alüminyum esaslı kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve karakterizasyonu. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **10**(1), 45-53.
- Barber, L. P., 2004. Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys, Degree of Master, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 148.
- Chen, S., Mussert, K., and Van Der Zwaag, S., 1998. Precipitation kinetics in Al6061 and in an Al6061-alumina particle composite. *Journal of Materials Science*, **33**(18), 4477-4483.
- Couper, M.J., and Parson, N.C., 2008. Precipitation strengthening and alloy design for 6061 Al-Mg-Si alloys, aluminium alloys—their physical and mechanical properties, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 1, 98-104.
- Çolak, N.Y., ve Turhan H., 2016. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al-Si/B₄C kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **28**(2), 259-266.
- Danh, N.C., Rajan K., and Wallace W., 1983. A TEM study of microstructural changes during retrogression and reaging in 7075 aluminum. *Metallurgical Transactions A*, **14**(9), 1843-1850.
- Ekici, E., Özçatalbaş Y., and Gülesin M., 2016. Mechanical and fracture behavior of B₄C reinforced Al composites produced by hot pressing. *Materials Testing*, **58**(2), 133-139.
- German R. M., 2007. Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Bölüm 8, Çeviri Editörleri, Sarıtaş S., Türker M., Durlu N., Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 264-267.
- German, R. M., 2014. Sinterleme Teorisi ve Uygulamaları, Çeviri Editörü, Gülsoy H. Ö., Nobel Yayınevi, Ankara, 240-248.
- Gökçe, A., 2020. Toz metalurjisi yöntemiyle Mg-Sn alaşımı üretimi ve karakterizasyonu. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **8**(1), 112-119.
- Gökçe, A., Fındık, F., ve Kurt, A. O., 2017. Alüminyum ve alaşımlarının toz metalurjisi işlemleri. *Mühendis ve Makina*, **58**(686), 21-47.
- Gökmeşe, H., Taşçı, U., ve Bostan, B., 2013. AA2014 Al matrisli B4C parçacıklı takviyeli kompozitlerin mikro yapı ve aşınma davranışlarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, **1**(4), 161-168.
- Güven, Ş. Y., 2011. Toz metalurjisi ve metalik köpükler. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, **1**(2), 22-28.
- İpekoğlu, G., Akçam, Ö., ve Çam, G., 2018. Farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhaların sürtünme karıştırma kaynağı için uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **18**(1), 324-335.
- Kalemtaş, A., 2014. Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech&Composites*, **22**, 18-30.
- Karabulut, H., 2011. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Al₂O₃, SiC ve B₄C Takviyeli Al Matrisli Kompozit Üretiminde Mekanik Alaşımlama Süresinin Kompozit Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 178.
- Karabulut, H., Çıtak R., ve Çinici H., 2013. Mekanik alaşımlama süresinin Al + %10 Al₂O₃ kompozitlerde eğme dayanımına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **28**(3), 635-643.
- Karabulut, Ş., Karakoç, H., and Çıtak, R., 2016. Influence of B₄C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061/B₄C composites. *Composites Part B: Engineering*, **101**, 87-98.
- Martín, J.M., and Castro F., 2003. Liquid phase sintering of P/M aluminum alloys: effect of processing conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, **143-144**, 814-821.
- Matik, U., ve Tanattı, K., 2017. Sıcak ekstrüze edilmiş AA7075-SiC_p kompozitlerin tribolojik

- karakteristiklerine ısıtılma işleminin etkisi. *Politeknik Dergisi*, **20**(4), 807-814.
- Momeni, H., Razavi, H., and Shabestari S., Effect of super solidus liquid phase sintering on the microstructure and densification of the Al-Cu-Mg prealloyed powder. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, **8**(2), 10-17, 2011.
- Nazik, C., 2013. Alüminyum matrisli B4C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 134.
- Paidpilli, M., Gupta, G.K., and Upadhyaya, A., 2017. Sintering response of aluminum 6061-TiB₂ composite: effect of prealloyed and premixed matrix. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **26**(9), 4470-4480.
- Seçilmiş, K., 2017. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş farklı oranlarda B₄C takviyeli Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 143.
- Shim, S. Y., Kim, D. H., Seong, Y. R., and Lim, S. G., 2011. Statistical analysis for influence of factors on morphological evolution in semi-solid Al-6Zn-2.5 Mg-0.5 Cu alloy by cooling plate method. *Materials Transactions*, **52**(5), 862-867.
- Tomiczek, B., Pawlyta, M., Adamiak, M., and Dobrzański, L. A., 2015. Effect of milling time on microstructure of AA6061 composites fabricated via mechanical alloying. *Archives of Metallurgy and Materials*, **60**, 215-217.
- Tong, X., Zhang, D., Wang, K., Lin, J., Liu, Y., Shi, Z., and Wen, C., 2018. Microstructure and mechanical properties of high-pressure-assisted solidification of in situ Al-Mg₂Si composites. *Materials Science and Engineering: A*, **733**, 9-15.
- Toptan, F., 2006. Alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin döküm yöntemi ile üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 164.
- Yakut R., 2015. B₄C takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin yarı katı karıştırma yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 128.
- Zhang J., Fan Z., Wang Y.Q., and Zhou B.L., 2001. Equilibrium pseudobinary Al-Mg₂Si phase diagram. *Materials science and technology*, **17**(5): 494-496.

The Effect of Initial Compacting Pressure on the Production of Ti₃Al with Low Porosity

Neşe ÖZTÜRK KÖRPE^{1*}, M. Hakan KARAŞ², Gökçe KILIÇ³

^{1*}Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Eskisehir.

²Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Eskisehir.

³Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Eskisehir.

^{1*}Sorumlu Yazar e-posta: neseoz@ogu.edu.tr

ID: <http://orcid.org/0000-0001-6868-8126>.

m.hakankaras@hotmail.com

ID: <http://orcid.org/0000-0001-9755-5683>.

gokcekilic.g@gmail.com

ID: <http://orcid.org/0000-0001-8980-1119>.

Geliş Tarihi: 17.11.2020

Kabul Tarihi: 10.06.2021

Abstract

Keywords

Titanium Aluminide;
Volume Combustion
Synthesis;
Intermetallic;
Powder Metallurgy

Reaction synthesis, or combustion synthesis is a production technique in which the thermal activation energy required for the formation of a compound is sustained by exothermic reaction heat released in the reaction. Ti-Al alloys are promising materials for aircraft industry, and they could be produced by self-propagating high-temperature combustion synthesis. The purpose of the present study was to research the effect of high initial compacting pressures (420 MPa, 630 MPa and 850 MPa) on the porosity of Ti₃Al which produced by volume combustion synthesis. Microstructure examinations were carried out with optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). For phase analyses, X-ray diffraction device(XRD) was used. A considerable decrease in porosity was obtained because of the increase in the initial compacting pressure.

Başlangıç Presleme Basıncının Düşük Gözenekli Ti₃Al'nin Üretimine Etkisi

Öz

Anahtar Kelimeler

Titanyum Alüminit;
Hacim-Yanma Sentezi;
Metallerarası Bileşik;
Toz Metalürjisi

Reaksiyon sentezi veya yanma sentezi, bir bileşiğin oluşumu için gerekli termal aktivasyon enerjisinin reaksiyonda açığa çıkan ekzotermik reaksiyon ısı ile sürdürüldüğü bir üretim tekniğidir. Ti-Al alaşımları uçak endüstrisi için gelecek vaat eden malzemelerdir ve kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık yanma sentezi ile üretilebilirler. Bu çalışmanın amacı, yüksek başlangıç presleme basınçlarının (420 MPa, 630 MPa ve 850 MPa) hacimsel yanma sentezi ile üretilen Ti₃Al bileşiğinin gözenekliliği üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Mikro yapı incelemeleri optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Faz analizleri için ise X-ışınları kırınım cihazı (XRD) kullanılmıştır. Başlangıç presleme basıncındaki artışa bağlı olarak gözeneklilikte önemli bir azalma olduğu sonucu elde edilmiştir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Introduction

Transition metal aluminides constitute a large group of intermetallic compounds that are of considerable interest due to their industrial importance. They possess a potentially attractive set of physical, chemical, and mechanical properties. Many of these compounds exhibit ordered structures, and are very stable due to their strong atomic bonding (Liu *et al.* 1990). Studies on intermetallic materials have been

started by the US Air Force in the early 1960s to produce the alloy having regular hexagonal Ti₃Al phase.

In recent years, the Ti-Al alloys have received particular attention as a promising structural material for aerospace applications. Intermetallic compounds can be produced through a variety of

methods. However, processing and manufacturing of intermetallic compounds involve several difficulties. For example, there are limited possibilities for forming and shaping components from intermetallic compounds due to their low ductility. Among various other production methods, powder metallurgical techniques offer the possibility of near-net shape production, with relatively fewer limitations (Moore and Feng 1995, Moore 1995).

Combustion synthesis is a novel synthesis method which utilizes the exothermic heat of reaction to make the reaction propagate in a self-sustaining manner through the reactants. The method has been applied to prepare many inorganic materials including intermetallic compounds and their composites. (Merzhanov 1996, Holt and Dunmead 1991). In the volume combustion synthesis, the entire sample consisting of the reactant mixture is heated uniformly in a controlled manner up to the self-supporting ignition temperature that occurs in the volume, and the reactants spontaneously transform during the combustion. This mode of synthesis, also known as shock wave or thermal explosion, is a highly efficient method for weaker exothermic reactions that require pre-ignition preheating because it reaches an extremely high combustion temperature in a noticeably short time. Volume combustion synthesis depends on the rate of reaction heat released and the rate of heat varying with the environment. The effect of dynamic reactions (reaction rate, reaction mechanism) and the nature of the products (phase composition of composites and elemental distribution in solid solution) determine the domain during synthesis reactions (Ergin 2007). The main disadvantage for reaction is that the reaction product is typically porous and thus requires additional processing if a bulk form is desired. Several new processing techniques have been examined to incorporate densification along with the reaction to provide a dense product. Fig. 1 shows the Ti-Al binary phase diagram which is characterized by a number of stable intermetallic compounds such as $Ti_3Al(\alpha_2)$, $TiAl(\gamma)$, $TiAl_2$ and $TiAl_3$. $TiAl$ and Ti_3Al play a prominent role in strengthening titanium alloys for

structural applications at elevated temperatures, and they are the most extensively studied phases among Ti-Al compounds and their alloys (Baker 1992, Murray 1987).

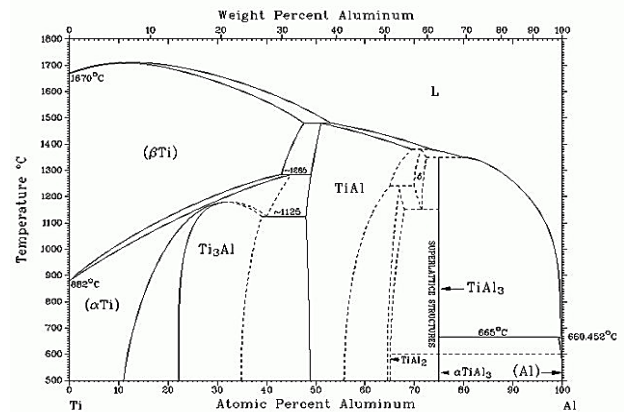


Figure 1. Al-Ti equilibrium phase diagram (Murray 1987)

Titanium aluminides can be produced using reactive synthesis, through both propagating as well as thermal explosion modes. However, due to the relatively low exothermicity of the reactions involved (Adeli *et al.* 2010), the thermal explosion mode is more suitable, particularly for industrial applications (Varma and Mukasyan 2002). In this study, combustion synthesis method was used to obtain titanium aluminide (Ti-26Al (at. %)) at 420 MPa, 630 MPa and 850 MPa compacting pressures. According to results of this study, it was observed that the combustion synthesis was partially realized in the 630MPa compacting pressure sample and traces of Titanium element were found, while the successful combustion synthesis process was realized for the sample pressed at 850 MPa compacting pressure.

Differential thermal analysis (DTA), used to measure heat flow into or out of a sample while it is being heated, can be used to determine onset temperatures and enthalpies of the reactions and phase transformations. Scanning electron microscopy is used for the characterization of microstructures and X-Ray powder diffraction technique is used for the phase characterization, crystalline structures.

2. Material and Experimental Method

Ti(at. 25%) Al samples were prepared using titanium powder (purity 99% and particle size 44 μm) and

aluminum powder (99.5%, 44 µm). Powder mixtures were prepared by making appropriate stoichiometric calculations for Ti₃Al.

Mixing powders were prepared by weighing with 0.0001 g balance in the vacuum chamber. Stainless steel vials and balls are used. Ti and Al powders were placed in vials together with the steel balls and mixed in the ball mill. Mixing was carried out at 250 rpm for 30 minutes. 3 grams of each powder mixture pressed in the hydraulic manual press. Compacting was performed in the steel molds each having an internal diameter of 10.1 mm and carried out under a pressure of 420, 630 and 850 MPa for 10 minutes. Ti₃Al intermetallic production from pressed samples was used with volume combustion synthesis (VCS) apparatus. The apparatus was prepared in the laboratory of Eskisehir Osmangazi University Metallurgical and Materials Engineering Department (Fig. 2).

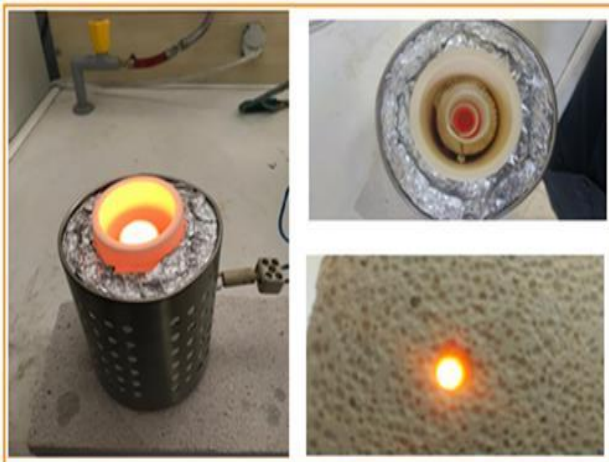


Figure 2. Combustion synthesis apparatus and synthesis stage of sample.

By analyzing DTA, the energy released by the exothermic reaction and the temperature required for preheating were determined in the synthesis of the powder mixture in the appropriate composition. Density values and porosity ratios of samples were calculated according to Archimedes Principle. In addition, microstructural studies of the samples were performed under optical microscope and scanning electron microscope (SEM) and phase analysis were performed with X-Ray diffraction device (XRD).

3. Results and Discussions

Thermodynamic calculations play an important role in selecting the appropriate method, especially for combustion synthesis. For this determination, adiabatic combustion temperature is primarily utilized in the combustion synthesis process. The reaction is



The combustion reaction is carried out under adiabatic conditions, that is, the assumption that there is no heat loss is that all heat(Q) is used to heat the reaction product to a temperature called adiabatic combustion temperature (T_{ad}), and calculated as $\sim 1380^\circ\text{K}$ by solving the following equation (Rogachev and Mukasyan 2014)

$$Q = -\Delta H_{298}^\circ = \int_{298}^{T_{ad}} C_p(\text{product})dT \quad (2)$$

where $C_p(\text{product})$ is the specific heat of products as a function of temperature and ΔH_{298}° is heat of formation. In addition, the thermodynamic data (Lee 1999, Inoue *et al.* 2004, Han *et al.* 2005, Dunand 1995, Jokisaari *et al.* 1995) in Table 1 was used in the calculations. According to Merzhanov's suggestion (Merzhanov 1975), the reaction cannot become self-sustaining unless $T_{ad} > 1800^\circ\text{K}$, meaning it is weakly exothermic, and a pre-heat is required for the reaction. Therefore, it is decided to apply the method of volume combustion synthesis.

The change of the enthalpy in the system and the adiabatic combustion temperature after preheating were determined by solving the following equation:

$$\begin{aligned} -\Delta H_{298}^\circ + \int_{298}^{T_{ig}} C_p(\text{reactants})dT = \\ \int_{T_{ig}}^{T_m} C_{p(\text{solid})}(\text{product})dT + \Delta H_m + \\ + \int_{T_m}^{T_{ig}} C_{p(\text{liquid})}(\text{product})dT \end{aligned} \quad (3)$$

where ΔH_m is melting enthalpy, $C_p(reactants)$ is specific heat of reactants, T_{ig} and T_m are ignition temperature and melting temperature, respectively. The adiabatic temperature is calculated as 2363°K.

Table 1. Thermodynamic Data

	ΔH_{298} (J/mol)	ΔH_m (J/mol)	T_m (K)	C_p (J/mol-K)
Al(solid)	0	-	933	$20.67+12.39*10^{-3}T$
Ti(α -solid)	0	-	1155	$22.1+10.04*10^{-3}T$
Ti(β -solid)	0	65870	-	$19.83+7.95*10^{-3}T$
				$123.3+33.5*10^{-3}T$
Ti_3Al (solid)	67000	-	1873	$5.2*10^6T^{-2}$
Ti_3Al (liquid)	-100000	-	-	$42.362-5.86*10^{-3}T$

§ $C_p(Ti_3Al \text{ solid})$ was used in the 470-1425 °K temperature range.

DTA data for system involving titanium, which is relatively low melting transition metals, show that the combustion reaction can occur in the solid-state before aluminum starts melting. Aluminides were observed to form in these systems prior to the combustion reaction, indicating the importance of solid-state inter diffusion between the reactant elements.

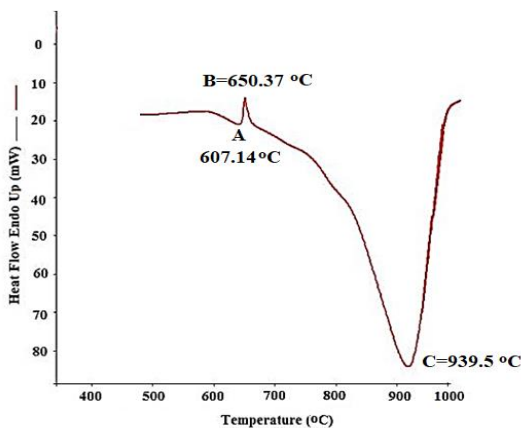


Figure 3. DTA heating curve of Ti-26Al (at.%) powder mixture.

Fig. 3 presents the DTA plot obtained for the Ti-26Al (at. %) powder compacts heated to 1000°C at 20°C min⁻¹. Samples were prepared using titanium and aluminum powders. During heating of samples, one endothermic peak and two exothermic peaks were observed. The small exothermic peak 'A', prior to the aluminum melting stage, can signify the formation of some intermetallic compounds due to the solid-state interdiffusion of reactants observed in several investigations. Especially $TiAl_3$ compound

formed initially is a metastable phase which disappears on further heating through the reaction with unreacted titanium (Sina and Iyengar 2015).

The B peak (~650 °C) was found to be compatible with the literature as the melting temperature of Al (Wang *et al.* 2011, Školáková *et al.* 2018). The second big exothermic peak(B) is associated with the formation of titanium aluminides (Školáková *et al.* 2018). This peak corresponds to the combustion reaction occurring between titanium particles and molten aluminum (Školáková *et al.* 2020). However, the peak refers to the reaction between liquid Al and solid-Ti particles is at 939.5°C (1213 K). There were solid-Ti particles and liquid Al at this temperature. Observed adiabatic temperature in DTA was lower than the calculated one because of the use of powder mixture. Normally, the unavoidable heat losses cause lower values than the calculated values (Sanin *et al.* 2006).

Macroscopic images of intermetallic samples synthesized by volume combustion synthesis are given in Fig 4. For microscopic examinations, the samples were ground with 180, 600, 800, 1000 and 1200 mesh SiC papers and then polished with 3 μm diamond paste. The samples for porosity were examined after the polishing step.

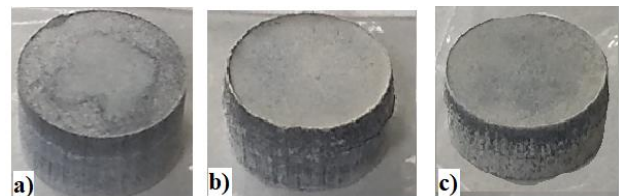


Figure 4. Ti_3Al samples after combustion respectively, a) pressed at 420 MPa, b) pressed at 630 MPa, c) pressed at 850 MPa.

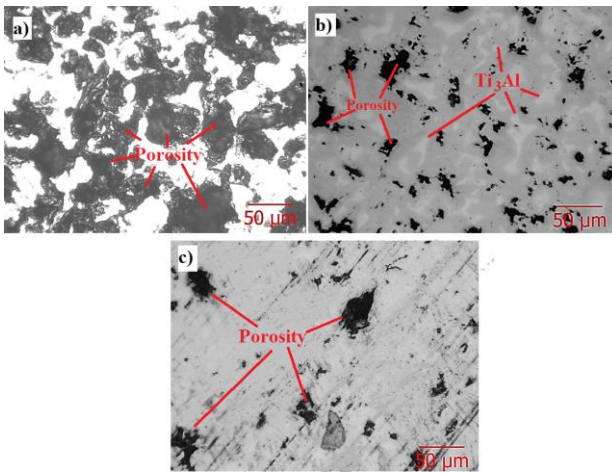


Figure 5. Optical microscope images of sample pressed at a) 420 MPa, b) 630 MPa, c) 850 MPa.

As can be seen from the optical microscope images given in Fig.5, the highest porosity ratio is observed at the lowest compacting pressure. Compaction of starting powders plays an important role in combustion synthesis reactions. Ti_3Al phase was also visualized as an light field in samples (Fig.5.b.) where the reaction was not completed. In the study carried out by Kurt *et al.* 2016, it was stated that the second phases in the interdendritic region have a bright contrast due to their higher atomic numbers compared to the Al element. According to the porosity values determined by Archimedes Method, porosity decreased for samples due to increased initial compacting pressure, see Fig. 6.

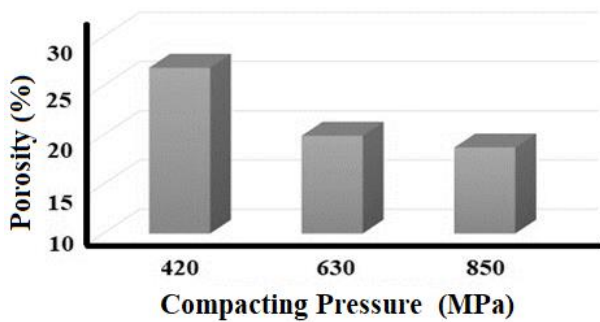


Figure 6. Porosity (%) - Compacting pressure diagram of synthesized samples.

In Fig. 7, SEM microstructure images of Ti_3Al intermetallic are given. The decrease in porosity is clearly seen due to the increased compacting pressure.

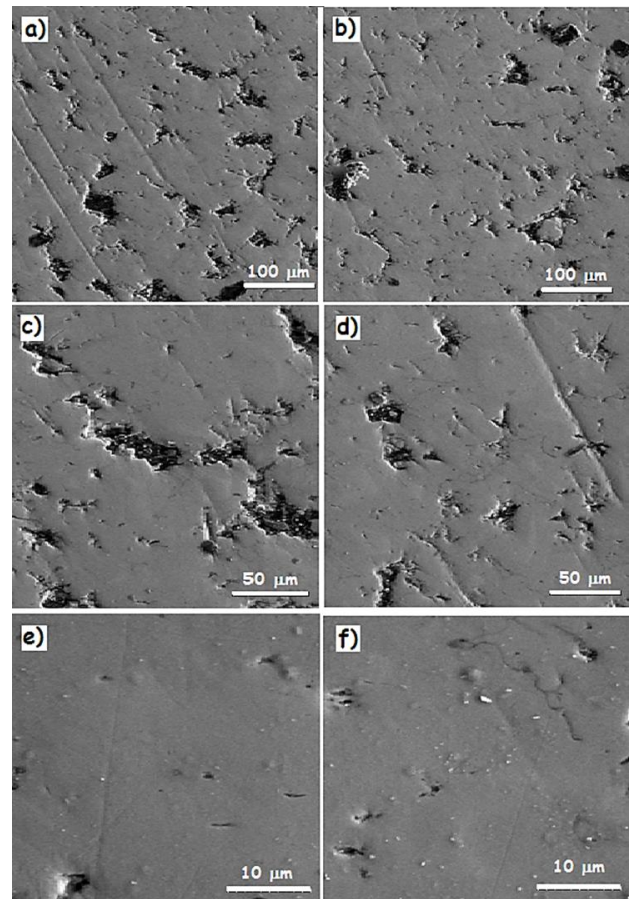


Figure 7. 200X, 500X, 2500X SEM microstructure images of Ti_3Al pressed at a-c-e) 630 MPa, b-d-f) 850 MPa.

SEM images of sample pressed at 420 MPa were not studied due to the high porosity according to the optical image and Archimedes calculation. Ti_3Al and residual transition metal (Ti) products were observed from the EDX analysis values of pressed at 630 MPa, see Fig.8.

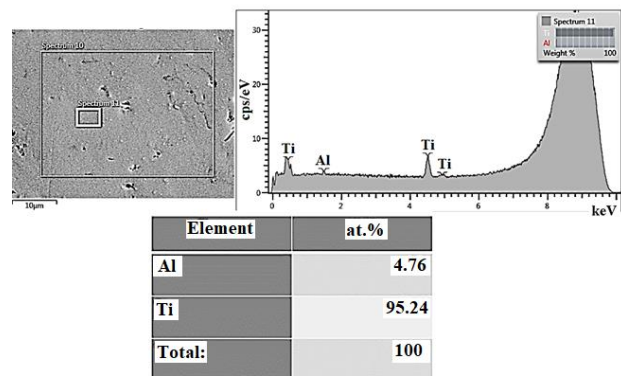


Figure 8. EDX analysis values of Ti_3Al pressed at 630 MPa.

According to results of the EDX analysis, stoichiometric ratios (at. 73.38% Ti, at. 26.62% Al) were reached for Ti_3Al pressed at 850 MPa, see Fig. 9.

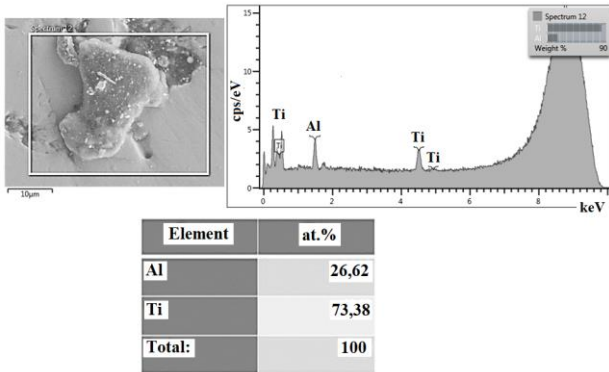


Figure 9. EDX analysis values of Ti_3Al pressed at 850 MPa.

The XRD analysis shown in the Fig. 10, after compacting at 630 MPa compacting pressure, Ti-phase was obtained in the synthesized samples as well as Ti_3Al intermetallic phase. The presence of Ti indicates that the desired transformation in the synthesis cannot be completed.

The effect of the initial density on the ignition and propagation of the reaction depends on the balance between good particle interactions and should not cause excessive heat loss due to increased thermal conductivity (Moore and Feng 1995).

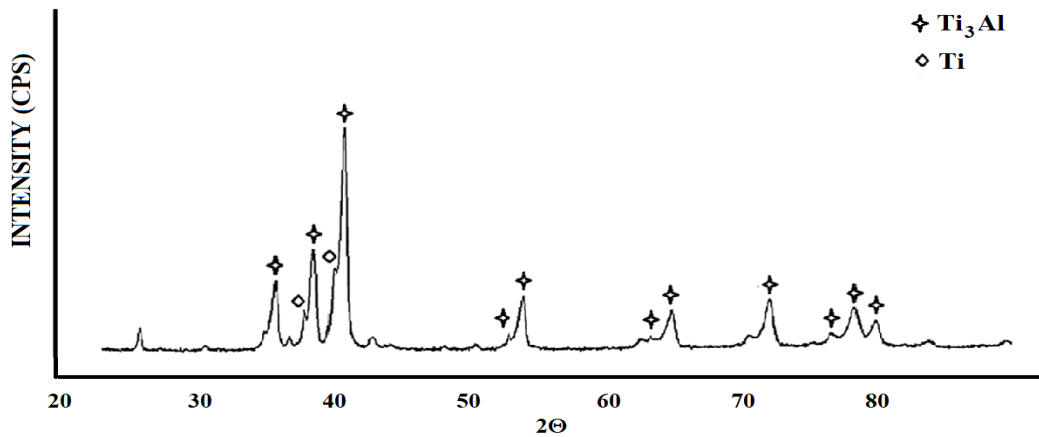


Figure 10. XRD data of sample pressed at 630 MPa.

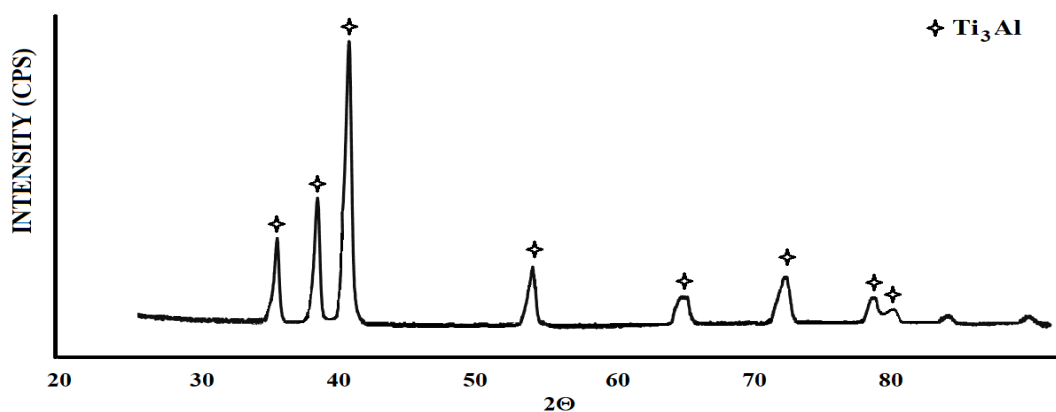


Figure 11. XRD data of sample pressed at 850 MPa.

The lowest porosity ratio was obtained for the Ti_3Al pressed with an initial compacting pressure of 850 MPa. According to XRD analysis, the desired Ti_3Al compound was obtained in these samples. Also, the best values in terms of reduction in porosity were

obtained at 850 MPa compacting pressure. As the density increases, the close contact between the reacting particles increases then it results an increase in the thermal conductivity and accelerates the pre-propagation.

4. Conclusion

As a result of the material characterization made within the scope of the present study, the compacting pressure of 850 MPa was found to be the optimum value. Increasing the initial compacting pressure provides interfacial contact between the titanium particles and the aluminum melt, shorter diffusion distances, and better dissolution of solid titanium into liquid phases.

5. References

- Adeli, M., Seyedein, S. H., Aboutalebi, M. R., Kobashi, M. and Kanetake, N., 2010. A study on the combustion synthesis of titanium aluminite in the self-propagating mode, *Journal of alloys and compounds*, **497(1-2)**, 100-104.
- Baker, H., 1992, Alloy phase diagrams, Vol. 3, ASM International Handbook, Materials Park, Ohio, 2-80.
- Dunand, D. C., 1995. Reactive synthesis of aluminite intermetallics, *Material and Manufacturing Process*, **10(3)**, 373-403.
- Ergin, N. 2007. Fe-Al İntermetalik Malzemenin Basınç Destekli Hacim Yanma Sentezi ile Üretimi ve Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 95.
- Han, X. J., Chen, M. and Guo, Z. Y., 2005. A Molecular Dynamics Study for the Thermo-physical Properties of Liquid Ti-Al Alloys. *International journal of thermophysics*, **26(3)**, 869-880.
- Holt, J.B. and Dunmead, S. D., 1991. Self-heating synthesis of materials. *Annual review of materials science*, **21(1)**, 305-334.
- Inoue, H., Sato, S., Nishi, T. and Waseda, Y., 2004. Heat capacity measurements of Ti-Al intermetallic compounds by heat-flux type differential scanning calorimetry with a triple-cell system. *High Temperature Materials and Processes*, **23(5-6)**, 305-312.
- Jokisaari, J. R., Bhaduri, S. and Bhaduri, S. B., 2005. Microwave activated combustion synthesis of titanium aluminides. *Materials Science and Engineering: A*, **394(1-2)**, 385-392.
- Kurt, H. I., Guzelbey, I. H., Salman, S., Asmatulu, R. and Dere, M. 2016. Investigating the relationships between structures and properties of Al alloys incorporated with Ti and Mg inclusions. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **138(3)**, 031006.
- Lee, H. G., 1999, Chemical thermodynamics for metals and materials, Imperial College Press, London, UK, 275-281.
- Liu, C. T., Stiegher, J. O. and Froes F. H., 1990, Ordered Intermetallics in: ASM Handbook, Vol 2, 10th ed., ASM International, 913-942.
- Merzhanov, A. G., 1975, Combustion processes in chemical technology and metallurgy, Chernogolovka: ISMAN, 174-188.
- Merzhanov, A. G., 1996. Combustion processes that synthesize materials. *Journal of materials processing technology*, **56(1-4)**, 222-241.
- Moore, J. J. and Feng, H. J., 1995. Combustion synthesis of advanced materials: Part I. Reaction parameters, *Progress in materials science*, **39(4-5)**, 243-273.
- Moore, J. J., 1995. Combustion synthesis of advanced materials. 2. Classification, applications and modeling, *Progress in materials science*, **39(4-5)**, 275-316.
- Murray, J. L., 1987, Aluminum-Titanium Phase Diagram, in Metals Handbook Desk Edition [ASM Handbooks Online].
- Rogachev, A. S. and Mukasyan, A. S., 2014, Combustion for material synthesis, CRC Press, 59-61.
- Sanin, V., Yukhvid, V., Sytshev, A. and Andreev, D. 2006. Combustion synthesis of cast intermetallic Ti-Al-Nb alloys in a centrifugal machine. *Kovove Materialy*, **44(1)**, 49.
- Sina, H. and Iyengar, S. 2015. Reactive synthesis and characterization of titanium aluminides produced from elemental powder mixtures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **122(2)**, 689-698.

Školáková, A., Salvetr, P., Novák, P. and Vojtěch, D. 2018.

Formation of Ti-Al phases during SHS process. *Acta Physica Polonica A*, **134**, 743-747.

Školáková, A., Salvetr, P., Leitner, J., Lovaši, T. and Novák,

P. 2020. Formation of Phases in Reactively Sintered TiAl₃ Alloy. *Molecules*, **25(8)**, 1912.

Varma, A. and Mukasyan, A.S., 2002, Combustion

synthesis of intermetallic compounds, Self-propagating high-temperature synthesis material, New York: Taylor & Francis, 1-34.

Wang, P. Y., Li, H. J., Qi, L. H., Zeng, X. H. and Zuo, H. S.

2011. Synthesis of Al-TiAl₃ compound by reactive deposition of molten Al droplets and Ti powders. *Progress in Natural Science: Materials International*, **21(2)**, 153-158.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035703 (718-723)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035703 (718-723)

DOI: 10.35414/akufemubid.826498

Araştırma Makalesi / Research Article

Stronsiyum Master Alaşım Takviyesinin Galfan (%95 Zn, %5 Al) Mikro Yapısı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Erkan KARAYİĞİT^{1*}, Mustafa ŞENYEL¹, Barış GÜNAY¹¹Güney Çelik Hasır ve Demir Mamulleri San. Tic. A.Ş., Adana, Türkiye

Sorumlu yazar e-posta: erkan@guneycelik.com.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8171-1178>

m.senyel@guneycelik.com.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5517-9763>

b.gunay@guneycelik.com.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5087-1280>

Geliş Tarihi: 16.11.2020

Kabul Tarihi: 18.06.2021

Öz

Anahtar kelimeler

Alaşım; Galfan; Mikro yapı; Stronsiyum

Bu çalışmada, stronsiyum elementinin galfan alaşımı (%95 Zn, %5 Al) üzerindeki mikro yapısal etkileri incelenmiştir. Stronsiyum elementi doğada saf olarak çok nadir bulunduğundan, master alaşım şeklinde tedarik edilmiştir. Bu alaşım, eriyik galfan alaşım içerisine belirli sıcaklık, ortam ve karıştırma parametreleri dikkate alınarak eklenmiş ve galfan mikro yapısı üzerindeki değişimler incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmasında, galfan külçeleri kül fırınında ergitilerek bahsedilen parametreler ışığında üzerine master alaşım eklenerek külçe halinde döküm alınmış, daha sonra dökümü alınan numunelerin mikro yapısal değişimleri incelenmiştir. Mikro yapısal incelemeler için, firma bünyesinde bulunan metalografi laboratuvarında metalografik işlemler yapılmış olup, diğer incelemeler için Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'ndan hizmet alımı yapılarak SEM analiz tekniği kullanılmıştır.

Investigation of Strontium Master Alloy Addition Effect to Galfan (%95 Zn, %5 Al) Microstructure

Abstract

Keywords

Alloy; Galfan; Microstructure; Strontium

In this study, microstructural impacts of strontium element in galfan alloy (%95 Zn, %5 Al) microstructure were investigated. The strontium element was supplied as master alloy due to the fact that strontium is quite rare element on the earth. Master alloy was added into molten galfan alloy by considering certain conditions such as temperature, atmosphere and mixing etc. After that, changes in galfan microstructure was investigated. The experimental studies were done in laboratory. During study, galfan ingots were melted in furnace next it was mixed in the light of parameters that mentioned above with master alloy and then new alloy was cast as ingot. Afterwards, alteration of casted specimens microstructures were researched. Metallographic operations were carried out in metallography laboratory in plant, and Scanning Electron Microscopy analysis technique was used for other investigations from Cukurova University Central Research Laboratory by outsourcing.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Varol (2018) yaptığı çalışmada, sıcak daldırma galvanizleme işleminin, çeliklerin çinko banyosuna daldırılmasıyla gerçekleştirilen bir proses olduğundan bahsetmektedir. Çelik, çinko banyosuna daldırılmadan önce tavlama işlemine tabi tutulur. Endüstriyel anlamda iki farklı tipte sıcak daldırma galvaniz prosesi bulunmaktadır. Birinci proses, haddelenmiş yassı çelikler için kullanılan, çeliğin %99,99 saflıkta çinko içeren bir banyoya daldırılmadan önce temizlenmesi ve tavlama kademelerini içeren genel galvanizlemedir. Diğer processe ise çelik, çinko banyosuna daldırılmadan önce flux adı verilen bir kimyasal banyosundan geçirilerek çinko kaplanması sağlanır. Bu yöntem, genellikle geometrik açıdan kompleks parçaların kaplanmasında tercih edilir. Galfan, %5 Al içeren bir kaplama alaşımıdır. Galfan kaplama için temelde iki çeşit kimyasal kompozisyon bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, %0,5'e kadar nadir toprak elementlerinden meydana gelen La ve Ce içeren bir alaşım olup ikincisi ise %0,5'e kadar Mg içeren bir alaşım. Bu eklentiler, çinkonun kaynak kabiliyetini ve akışkanlığını arttırmanın yanı sıra, çelik üzerine kaplanan galfan alaşımının yüksek korozyon dayanımı göstermesini de sağlar. Galfan bu özellikleri sayesinde, mimari paneller boyanmadan önce kaplama olarak ve bazı otomotiv parçalarında kullanılmaktadır.

Vagge ve Raja (2009)'a göre çinko içerisindeki %Sr oranının %0,02 olduğunda dendritik tane boyutu %86 oranında incelmeye göstermektedir. Stronsiyum içeren çinko kaplamaların zeta fazının ince olması durumunda, çatlamalara karşı olan direnç ve adhezyon kuvvetinde artış meydana gelecektir. Yapıdaki çatlamların miktarı, yapı içerisinde gama fazının bulunup bulunmamasına, zeta/delta faz oranına ve tabakalarda bulunan demir elementinin dağılımına göre değişmektedir. Stronsiyum, kritik çekirdeklenme enerjisini azaltarak katı-sıvı ara yüzey enerjisini ve yüzey gerilimini düşürür. Ara yüzey enerjisinin düşmesi, çekirdeklenme oranını arttırarak ince taneli bir mikro yapı elde edilmesini sağlar. Eğer yapı ince taneli olursa, kaplama tane sınırlarının kapladığı alan, yapı içerisine dağılmış halde bulunan impüritelerin kapladığı alandan daha

büyük olacaktır. Bu nedenle dendritler arasındaki ve tane sınırlarındaki impürite konsantrasyonu az olmalıdır.

Liu *et al.* (2017)'a göre çinko içerisindeki %Sr oranı %0,03 olduğunda yapıda bulunan SrZn₁₃ fazının ortalama büyüklüğü 100 nm iken bu oran %0,1'e yükseldiğinde SrZn₁₃ fazının ortalama büyüklüğü 1µm'ye yükselmiştir. Ek olarak yapıdaki Sr oranının %0,1 olduğu durumlarda genel mikro yapının lamellar ötektik bir yapı sergilediği ve %0,15 Sr oranında ise ötektik morfolojinin hacimsel oranının azaldığı belirlenmiştir.

Şevik ve Kurnaz (2014) yaptığı çalışmada, stronsiyum elementinin Mg-Al alaşım sistemlerinde özellikle oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık ortamlarında dayanım arttırıcı element olarak kullanıldığını belirtmektedir.

Öztürk vd. (2018)'nin araştırmasında, alaşım sistemlerine eklenen sodyum ve stronsiyumun sistemin yüzey gerilimini ve hacimsel çekme miktarını etkilediği konusunda çalışmalar bulunmaktadır.

Labisz *et al.* (2016)'a göre, alüminyum içeren çinko alaşımlarda, döküm çekintileri görülme ihtimali daha yüksektir. Bu durumu önlemek amacıyla, yapıya stronsiyum ilave edilerek döküm sistemindeki akıcılık, dökülebilirlik ve sıcak çatlama eğilimi arttırılır ve böylece döküm çekintisinin getirdiği sorunlar azaltılmış olur.

Endüstriyel ve akademik anlamda çelik levha, boru vb. malzemeler üzerine korozyon koruması sağlamak amacıyla Zn95Al5 gibi çinko türevi ve farklı alaşımlarla çeşitli kaplamalar geliştirilmeye çalışılmakta ve bu konuda bazı olumlu gelişmeler yaşansa da, özellikle çelik tel üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması ve konu ile ilgili literatür yetersizliği bu konudaki çalışmaları daha değerli hale getirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, stronsiyum elementinin, galfan (%95 Zn, %5 Al) alaşımı üzerinde meydana getirdiği mikro yapısal değişimleri incelemektir.

2. Materyal ve Metot

Mevcut çalışmalar firma bünyesinde bulunan kimya laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, kül fırını içerisinde SiC potalarda 450 °C-550°C aralığında galfan alaşım içerisine sırasıyla %0,02, %0,03, %0,06, %0,1, %0,15 oranlarında master alaşım (AlSr₁₀) ilave edilerek ergitme işlemi yapılmıştır. Bu ergitme işlemi yaklaşık 85-150 dakika aralığında gerçekleştirilmiş olup, bu süre sonunda döküm alınmıştır. Döküm sonunda numuneler şebeke suyu sıcaklığında herhangi bir ısıtıcı/soğutucu kullanmadan suda ve oda sıcaklığında havada olmak üzere iki farklı şekilde soğutulmuştur.



Şekil 1. Ergitme işlemi 1200°c kapasiteli Elektra Rezistans Markalı kül fırınında gerçekleştirilmiştir

Alaşımlandırma işleminin homojen olması amacıyla, fırın içerisinde inert ortam şartları SF₆ gazı yardımıyla sağlanmış ve 450 °C ve üzerindeki çalışma sıcaklıklarına dayanıklı mekanik karıştırıcı yardımıyla homojenizasyon fiziksel olarak desteklenmiştir.



Şekil 2. Döküm işlemi

Döküm sonunda elde edilen numuneler dökümden hemen sonra döküm kalıbı ile birlikte ortalama 420-450°C aralığında yaklaşık 3-5 saniye beklendikten sonra suda soğutulmuş, havada soğutma parametresi için ise numuneler laboratuvar ortamında döküm sonrası hiçbir müdahale olmaksızın soğumaya bırakılarak ardından metalografik işlemler uygulanmıştır.

Metalografik işlemler esnasında öncelikle kaba ve ince zımparalama işlemleri, ardından parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Parlatıcı olarak su bazlı elmas süspansiyon, dağlama işlemi için %4'lük nital çözeltisi kullanılmıştır.

Dağlama işleminden sonra elde edilen numuneler firma laboratuvarında bulunan, Nikon ECLIPSE LV150N/LV150NA marka optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiş ve mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen veriler, bulgular ve tartışma kısmında paylaşılmıştır.



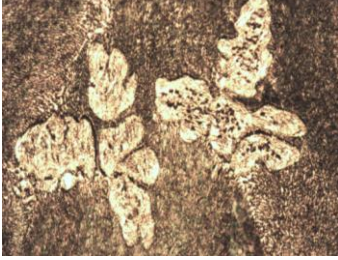
Şekil 3 : Dökümü alınan 403*202 mm boyutundaki silindirik numune.

3.Bulgular ve Tartışma

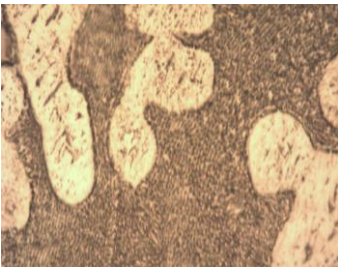
Laboratuvar çalışmaları kapsamında, öncelikle stronsiyum ilave edilmemiş galfan alaşım külçesi mikro yapısal olarak incelenmiş, daha sonra galfan alaşımına sırasıyla %0,02, %0,03, %0,06, %0,1, %0,15 oranlarında stronsiyum elde edilecek şekilde master alaşım miktarı hesaplanarak ilave edilmiştir. Yapılan tüm alaşımlandırma çalışmalarında galfan içerisinde bulunan Zn ve Al miktarlarında eser miktarda azalma görülürken, galfan içerisinde mevcut olarak bulunan %0,0050' den daha az miktardaki Sr oranı sırasıyla ; %0,0282, %0,0319, %0,0650, %0,101 ve %0,151 seviyelerine ulaşmıştır.

Ardından, bu mikro yapılar karşılaştırılarak stronsiyum içeren master alaşımın, galfan alaşımının mikro yapısında meydana getirdiği değişim optik mikroskop ve SEM yardımıyla incelenmiştir.

a)20X



b)50X



Şekil 4. Stronsiyum ilave edilmemiş galfan külçenin mikro yapısı

Şekil 4’de gösterilen galfan mikro yapısında açık renkler ana metal olan çinkoyu temsil ederken, koyu renkli yapılar ise alüminyum-çinko reaksiyonu sonucu ortaya çıkan ötektik yapıları temsil etmektedir.

a)20X



b)50X

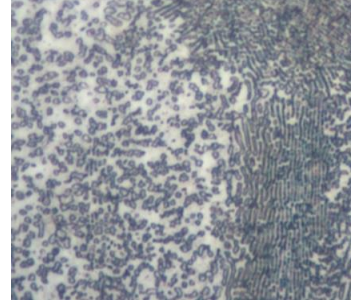


Şekil 5. %0.1 Sr içeren galfan mikro yapısı

a)20X



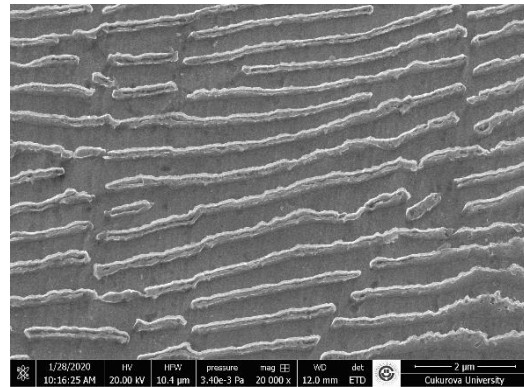
b)50X



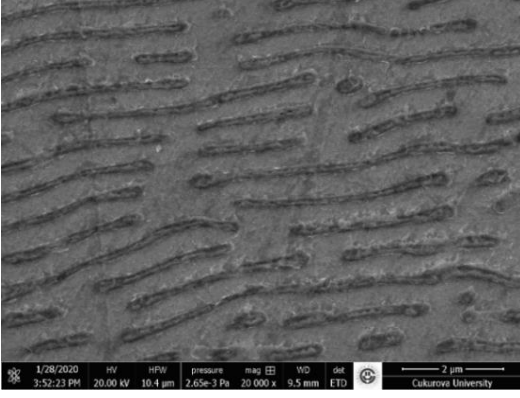
Şekil 6. %0.15 Sr içeren galfan mikro yapısı

Şekil 5’de %0,1 stronsiyum içeren galfan mikro yapı görüntülerinde, stronsiyum içeren master alaşımın galfan mikro yapısı üzerinde dendritik mikro yapıyı lamelar yapıya dönüştürücü etkisi görülmektedir.

Stronsiyum oranı %0,15’e yükseltildiğinde de benzer etkinin devam ettiği Şekil 6.’da görülmektedir. Ancak yapılan SEM incelemelerinde, lameller arası mesafenin galfan alaşım yapısına eklenen Sr oranı ile lineer olarak değişmediği ve yukarıda bahsedilen stronsiyum oranlarının artış veya azalışında bu mesafenin herhangi bir homojen dağılım göstermediği belirlenmiştir.



Şekil 7. %0,1 Sr içeren galfan mikro yapısı

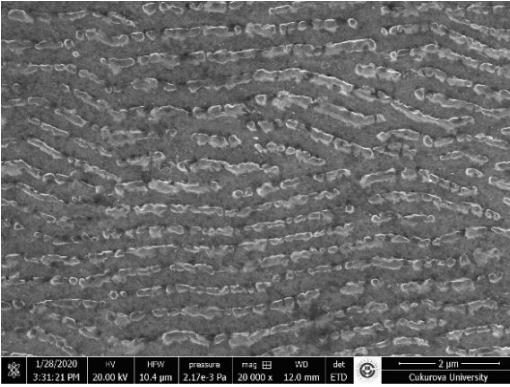


Şekil 8. %0,15 Sr içeren galfan mikro yapısı

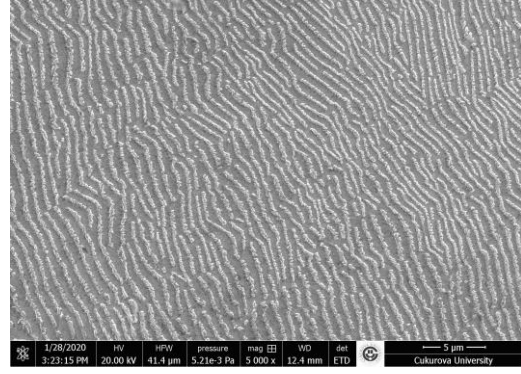
Şekil 7. ve Şekil 8.'de %0,1 ve %0,15 Sr içeren galfan alaşımlarının SEM görüntüleri görülmektedir.



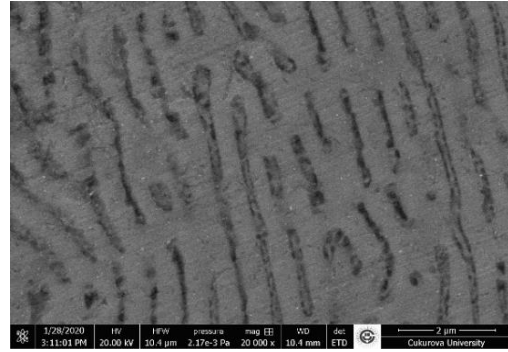
Şekil 9. %0,1 Sr içeren suda soğutulmuş galfan mikro yapısı



Şekil 10. %0,1 Sr içeren havada soğutulmuş galfan mikro yapısı



Şekil 11. %0,15 Sr içeren suda soğutulmuş galfan mikro yapısı



Şekil 12. %0,15 Sr içeren havada soğutulmuş galfan mikro yapısı

Şekil 9,10,11 ve 12'de %0,1 ve %0,15 Sr içeren galfan alaşımlarının farklı soğutma tiplerindeki SEM görüntüleri görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan araştırma sonucunda stronsiyum elementinin galfan mikro yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda, stronsiyum elementinin galfan alaşımına ilavesinin mikro yapı içerisinde bulunan dendritik yapıların lamelli yapılara dönüşme eğilimini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca döküm sıcaklığı, inert ergitme ortamı, fırında kalma süresi, alaşımlandırma sıcaklığı ve süresi, karıştırma süresi ve alaşımlandırılan %Sr oranının bu alaşım sistemi için en önemli parametreler olduğu belirlenmiştir. Dökümü alınan numunelere havada ve suda olmak üzere iki farklı şekilde soğutma uygulanmış, %0,1 Sr içeren galfan numunesinin suda soğutulması sonucunda lameller arası ortalama mesafe 264,74 nm, havada soğutulması sonucunda ise 239,78 nm olarak ölçülmüştür. %0,15 Sr içeren alaşıma da aynı ölçümler yapılmış olup suda soğutulmuş numunede

lameller arası ortalama mesafe 570,96 nm havada soğutulmuş numunede ise 592,54 nm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla soğuma hızının bu çalışma üzerinde herhangi bir etkisi olduğu gözlemlenmemiştir.

Çizelge 1. %Sr Oranına Göre Lameller Arası Ortalama Mesafe Değişimi (Suda soğutma)

% Sr Oranı	Lameller Arası Ortalama Mesafe (nm)
%0,02	350,12
%0,03	358,05
%0,06	292,88
%0,1	264,74
%0,15	570,96

Çizelge 1.'de %Sr değerlerine (%0,02-0,03-0,06-0,1-0,15) göre lameller arası ortalama mesafenin değişimi gösterilmiştir. Belirlenen oranlardaki %Sr içeren galfan alaşımlarında lameller arası ortalama mesafenin değişimi incelenmiş olup, bu incelemeler sonucunda ortalama mesafe değişiminin %Sr oranı ile lineer bir ilişki göstermediği saptanmıştır.

Labisz *et al.* (2016) yaptığı çalışmada Zn-Al-Cu alaşımlarına Sr ilavesiyle alaşım sistemi içerisinde morfolojik değişimlerin meydana geldiğini ve α' fazlarındaki yünsü tabakaların dendritik ve küresel hale dönme eğilimi gösterdiğini belirtmiştir. Nitekim yapılan bu çalışmada da Zn95Al5 alaşım sistemine eklenen Sr mastar alaşımının da Zn95Al5 alaşımı üzerinde benzer etkileri sergilediği, yapıda bulunan dendritik yapıların kalınlığını inceltici etki gösterdiği belirlenmiştir.

Liu *et al.* (2017) araştırmasında Zn-Mg alaşım sistemlerine Sr elementi eklendiğinde bu elementin özellikle alaşımdaki kaba η dendritlerini inceltici etki gösterdiği ve alaşımın mekanik özelliklerine pozitif yönde etki ettiğini bildirmiştir. Bu bilgiden hareketle Sr elementinin çinko alaşımları üzerinde tane inceltici etki gösterdiği söylenebilir. Bu çalışmadaki Zn95Al5 alaşımlandırılmasında da benzer etkiler

gözlenmiş, özellikle %Sr oranına göre meydana gelen değişimler incelenerek ortaya koyulmuştur.

5. Kaynaklar

Labisz, K., Krupiński, M., Pawlyta, M., Matus, K., Kremzer, M., & Dopierala, K. (2016). High resolution TEM investigations and TDA analysis of zinc alloy with strontium addition. *Acta Physica Polonica A*, **130** (4), 823–826.

Liu, Y., Geng, C., Zhu, Y., & Chen, X. (2017). Effect of Sr addition on microstructure evolution and mechanical properties of Zn[–]4%Al hypoeutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **695**, 443–451.

Öztürk, İ., Hapçı Ağaoğlu, G., Erzi, E., Dispınar, D., & Orhan, G. (2018). Effects of strontium addition on the microstructure and corrosion behavior of A356 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **763**, 384–391.

Şevik, H., & Kurnaz, S. C. (2014). The effect of strontium on the microstructure and mechanical properties of Mg-6Al-0.3Mn-0.3Ti-1Sn. *Journal of Magnesium and Alloys*, **2** (3), 214–219.

Vagge, S. T., & Raja, V. S. (2009). Influence of strontium on electrochemical corrosion behavior of hot-dip galvanized coating. *Surface and Coatings Technology*, **203** (20–21), 3092–3098.

Varol, G. E. (2018). Defects Of Hot Rolled And Cold Rolled Flat Steels Due To Hot Dip Galvanizing Process And Their Prevention Methods. Yüksek lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 117.

Effect of Cut-outs on the Free Vibration Response of Basalt/Carbon Hybrid Composites

Özkan ÖZBEK^{1*}, Yüksel TOKUR BOZKURT²

¹ Kilis 7 Aralık University, Faculty of Engineering and Architecture, Mechanical Engineering Department, Kilis.

² Gaziantep University, Voc. Sch. of Technical Sciences, Department of Electronics and Automation, Gaziantep.

*Sorumlu yazar, e-posta¹: ozkanozbek@kilis.edu.tr
e-posta²: tokur@gantep.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1532-42620>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3195-132X>

Geliş Tarihi: 01.03.2021

Kabul Tarihi: 10.05.2021

Abstract

The current work deals with an experimental investigation about the influence of cut-outs on dynamic characteristics of basalt/carbon hybrid fiber reinforced composite laminates. The composite samples have been fabricated via vacuum assisted resin transfer molding technique and cut-outs in the form of triangular, square and circular shapes with equal areas have been processed on them to systematically analyze the influences of cut-outs. The dynamic characteristics of the samples have been examined by conducting free vibration-damping tests and expressed in terms of natural frequency and damping ratio using the frequency response and time-acceleration response. The results show that the damping characteristics of the composite samples can be remarkably improved with the help of cut-outs which provide improvements approximately between 2.41% and 16.65% in damping ratio values. The maximum and minimum variations in damping ratio have observed for non-hybrid carbon fiber reinforced composite samples with triangular cut-out (T-C6) and hybrid basalt/carbon fiber reinforced composite samples with circular cut-out (C-B6), respectively. On the other hand, the presence of cut-outs have led to decreases in natural frequency values as a result of reduction in stiffness caused by the cut-outs. This point out that employment of cut-outs can be a promising application to meet the natural frequency requirements of engineering systems constructed with hybrid fiber reinforced composite laminates.

Keywords

Cut-out;
Hybrid composite;
Damping;
Vibration,
Stacking sequences

Kesiklerin Bazalt / Karbon Hibrit Kompozitlerin Serbest Titreşim Tepkisine Etkileri

Öz

Mevcut çalışma, kesiklerin bazalt / karbon melez fiber takviyeli lamine kompozitlerin dinamik özellikleri üzerindeki etkisi hakkında deneysel bir araştırma ile ilgilidir. Kompozit numuneler, vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniği ile imal edilmiş ve kesiklerin etkilerini sistematik olarak analiz etmek için üzerlerinde eşit alanlara sahip üçgen, kare ve dairesel şekiller şeklinde delikler açılmıştır. Numunelerin dinamik özellikleri, serbest titreşim sönümlenme testleri yapılarak incelenmiş ve frekans tepkisi ve zaman-ivme tepkisi kullanılarak doğal frekans ve sönümlenme oranı cinsinden ifade edilmiştir. Sonuçlar, kompozit numunelerin sönümlenme özelliklerinin, sönümlenme oranı değerlerinde yaklaşık %2,41 ile %16,65 arasında artışlar sağlayan kesikler yardımıyla önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Sönümlenme oranındaki maksimum ve minimum varyasyonlar, sırasıyla üçgen kesikli hibrit olmayan karbon fiber takviyeli kompozit numuneler (T-C6) ve dairesel kesikli hibrit olmayan bazalt fiber takviyeli kompozit numuneler (C-B6) için gözlemlenmiştir. Öte yandan, kesiklerin varlığı, deliklerin neden olduğu sertlikte azalmanın bir sonucu olarak doğal frekans değerlerinde düşümlere yol açmıştır. Bu, kesiklerin kullanılmasının, hibrit fiber takviyeli kompozit laminatlarla inşa edilen mühendislik sistemlerinin doğal frekans gereksinimlerini karşılamak için umut verici bir uygulama olabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler

Kesik;
Hibrit kompozit;
Sönümlenme;
Titreşim,
İstifleme sırası

1. Introduction

Over the past few decades, compared to traditional monolithic materials, polymer-based composite materials have been attracted attentions in many engineering fields with their superior properties such as higher specific strength/stiffness (Madenci *et al.* 2020, Bozkurt 2017, Oğuz *et al.* 2020, Gemi *et al.* 2020, Özütok and Madenci 2017), fatigue life (Roundi *et al.* 2017), resistance to corrosion (Kumar *et al.* 2019, Özkılıç *et al.* 2020, Madenci *et al.* 2020) and good thermal insulation (Yasir *et al.* 2018), and have been extensively used in a wide range of lightweight members with high load-carrying capacity for various engineering applications like construction, aerospace and automotive in recent years (Khosravi and Eslami-Farsani 2016, Uslu *et al.* 2021, Özbek 2020, Bulut *et al.* 2017, Aksoylu *et al.* 2020, Madenci and Özütok 2020, Özkılıç *et al.* 2021, Madenci *et al.* 2020). Moreover, the superior dynamic performance of polymer-based composites widen their popularity for the structural applications such as space shuttles, aircrafts, marine vessels, vehicles, etc (Draiche *et al.* 2014, Qatu *et al.* 2010) that subjected to vibratory loads in service conditions. Although the plenty of researches related with mechanical and thermal properties of composite materials, comparatively limited studies devoted to their dynamic mechanical properties are found in the literature (Noor and Burton 1989, Bozkurt *et al.* 2018, Bulut *et al.* 2020, Huang and Tsai 2015, Murugan *et al.* 2016, Bedon 2019, Duc *et al.* 2017, Bhudolia *et al.* 2017, Wang *et al.* 2019, Özütok and Madenci 2013, Özütok *et al.* 2014). Additionally, the different design parameters such as hybridization, stacking sequences of the composite materials has recently attracted the attention due to the their direct influences on mechanical properties of composite materials (Gemi 2018, Özbek and Bozkurt 2019, Doğan *et al.* 2019, Gemi *et al.* 2020). Furthermore, only a few studies devoted to free vibration characteristics of basalt or carbon fiber reinforced composites are seen in the literature. Bozkurt and Gökdemir (2018) examined the influences of basalt hybridization on the tensile and dynamic characteristics of carbon fiber reinforced composite laminates. It was demonstrated that the

inclusion of basalt fiber resulted with an enhancement in damping properties and decrease in tensile characteristics of carbon fiber reinforced composite laminates. Ramakrishna *et al.* (2021) investigated the vibration-damping characteristics of carbon/basalt hybrid fiber reinforced composite laminates that modified with graphite powders. The samples with three different graphite content (1 wt.%, 2 wt.% and 3 wt.%) and stacking sequences were fabricated by hand lay-up technique. They stated that the 3 wt.% graphite powder content was significantly affected the vibration characteristics of basalt/carbon composites. Ilangoan *et al.* (2020) performed the experimental, numerical and analytical studies regarding the free vibration behaviors of basalt/epoxy and E-glass/epoxy composite tubes with silica nanoparticles. They reported that lower amount of silica nanoparticle inclusion (up to 1.5 wt.%) resulted with the increases in natural frequency and damping factor values. Also, they said that BFRP composites showed higher damping properties than GFRP composite samples.

Cut-outs are inevitable geometrical requirements in the structural members for various purposes such as reducing the weight, providing access to different areas, quality control, inspection purposes, ventilation to facilitate heat distribution, to avoid induced acoustic noise (Sinha *et al.* 2021, Mandal *et al.* 2020). The cut-out applications with different geometric shapes are seen in many fields in the aeronautical, mechanical, electrical and civil structures (Hashemi and Hamza-Cherif 2020). The dynamic response of a structural member can be influenced at a certain level due to the application of cut-outs. This leads to increase the possibility of resonance which means the maximum damage. So, the investigation of the dynamic characteristics of a member with cut-outs is a very crucial issue for the structural designs to prevent possible unpredictable scenarios. Several studies devoted to vibration-damping behaviors of polymer-based composites with cut-outs are seen in the literature (Sivakumar *et al.* 1999, Poore *et al.* 2008, Erkliğ *et al.* 2013, Bicos and Springer 1989). Sinha *et al.* (2021) performed the experimental and numerical studies on the free vibration response of glass fiber reinforced

composite laminates with cut-outs. The samples having different size and position of cut-outs have been examined at various boundary conditions. No significant effects in frequency were obtained from the cut-out position except eccentric and concentric cut-outs. Erklığ *et al.* (2014) examined the natural frequency responses of hybrid composites with or without cut-outs. The reinforcement fibers of Kevlar, glass, and carbon were used for the hybridization of composite laminates. The increment in cut-out size ratio (D/W) resulted with decreases in the natural frequency of the samples. Mondal *et al.* (2015) investigated the experimental and numerical studies on the dynamic characteristics of sandwich composite plates with cut-outs at various locations. They expressed that frequency reduces towards the minimum as the hole moves off-center towards the larger side of the plate.

To the best knowledge of authors to date, there is no published study in the open literature about the effect of cut-outs on dynamic properties of basalt/carbon hybrid fiber reinforced composites. Hence, the motivation of the current study is to experimentally evaluate the effect of cut-outs on the dynamic properties of basalt/carbon fiber reinforced composite laminates in terms of natural frequency and damping ratio using the frequency response and time-acceleration response. In order to gain a better insight into the effect of cut-out application, the composite samples (three hybrid and two non-hybrid) fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding were prepared and subjected to free vibration tests. Three different cut-out shapes (triangular, square and circular) with the equal area were processed to the center of the beam type samples.

2. Materials and Method

2.1 Materials

In order to evaluate the dynamic responses of composite laminates, basalt plain woven fabric (supplied from Tila Kompozit Ltd. Şti., Turkey) and carbon plain woven fabric (provided by Dost Kimya A.Ş., Turkey) were used as reinforcements in

fabrication of composite laminates. For the matrix phase of composites, an epoxy (MOMENTIVE-MGS L160) and a hardener (MOMENTIVE-MGS H160) procured from Dost Kimya A.Ş., Turkey, were mixed in the stoichiometric weight ratio of 100:25, respectively. The mixture was prepared at 8000 rpm for 30 minutes with a mechanical stirrer. The mechanical and physical properties of fabrics and resin were presented in Table 1.

Table 1. The mechanical and physical properties of fabrics and resin materials.

Material	Density	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Fabric thickness (mm)
Basalt fabric	202 g/cm ²	2000-2300	90-92	0.28
Carbon fabric	204 g/cm ²	2500-3000	200-700	0.25
Epoxy (neat)	1.18-1.20 g/cm ³	70-80	3.2-3.5	-

2.2 Preparation of Samples

The vacuum-assisted resin transfer molding process, illustrated in Figure 1, was implemented for the manufacturing of both hybrid and non-hybrid composite samples. A rigid-flat aluminum platform equipped with resistance heating elements was utilized as a bottom mold. The fabrics (40 cm x 50 cm) with twelve layers were cut and placed on the rigid platform. Then, a peel ply and a resin distribution media, respectively, were stacked over fabric preform to provide a uniform distribution of resin and easy removal of the composite laminates from the mold structure. After that, the fabric stack, peel ply and resin distribution media were covered with a vacuum bagging film to create a closed media as the mold. Lastly, the prepared resin mixture was injected into the mold system with the help of 680 mmHg vacuum pressure. After the whole laminates were wet, the initial curing process was started by turning off the resin inlet valve and leaving the composite laminates at 80°C temperature for 8 hours. Following this, post-curing of composite laminates was performed at 40°C temperature for 2 hours.

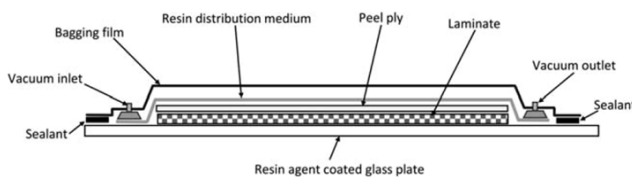


Figure 1. Schematic illustration of vacuum-assisted resin transfer molding (Bozkurt 2017)

The different stacking sequences, as shown in Figure 2, were used in each 12 layered composite laminates. The hybridization process was started with totally basalt/epoxy fiber reinforced composites and were ended with totally carbon/epoxy fiber reinforced composites by replacing twos of inner basalt fabric layers symmetrically with carbon fabrics (2, 6, 10 number of layers).

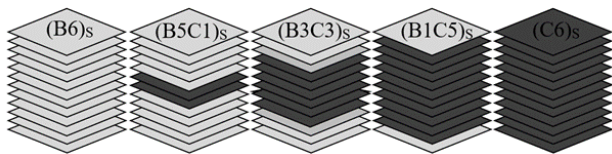


Figure 2. Stacking sequences of basalt (B) and carbon (C) fabric layers

After the production process, vibration test samples with 20 mm wide and 200 mm length were prepared by using a 3-axis CNC router. The tests were repeated for at least five samples of each composite configuration and the values were averaged. The naming and thickness information of each configuration were given in Table 2.

Table 2. Naming and thickness information of composite laminates

Configuration	Naming	Thickness (mm)
(B6) _s	B6	2.18
(B5C1) _s	H1	2.22
(B3C3) _s	H2	2.43
(B1C5) _s	H3	2.63
(C6) _s	C6	2.86

The cut-outs in the form of triangular, square and circular shapes with the same areas were used to evaluate the effects of cut-outs on the free vibration response of composite laminates as shown in Figure 3. An equal area, 43.3 mm, was considered for all cut-outs and each of them was compared with the

samples without cut-outs. The diameter and edge values of cut-outs were 7.42 mm, 6.58 mm and 10 mm for circular, square and triangular cut-outs, respectively. After this section, the prefix U, T, C and S notations were used for expressing of without cut-out, triangular cut-out, circular cut-out and square cut-out, respectively.

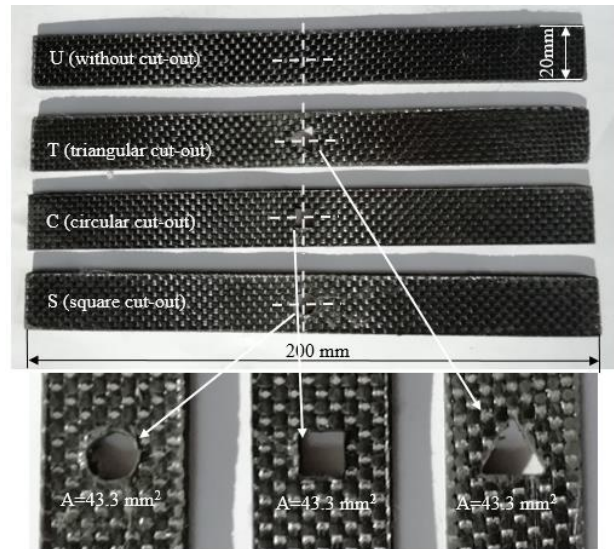


Figure 3. Test samples with different cut-out shapes

2.3 Free Vibration Experiments

An experimental set-up composed of an accelerometer, impact hammer and Signal Express software, was used to determine modal vibration properties of the fabricated test samples. A general-purpose PCB 086C03 modal impact hammer to impulse a force on composite sample and a general-purpose PCB 352C03 ceramic shear ICP accelerometer to measure time-dependent acceleration response were utilized. The 50 mm portion of composite beam samples were clamped to provide cantilever beam behavior. The accelerometer was placed near the cut-out region which was approximately 40 mm away from the clamped side towards the free end of the sample. The tests were performed by exciting each sample at least five times from the same identical point which was near to the cut-outs (opposite side of the accelerometer). A photographic view and the excitation point were seen in Figure 4.

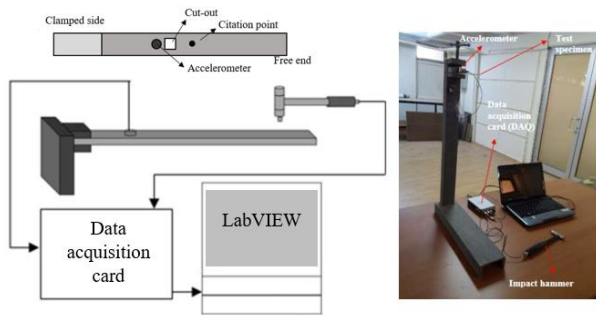


Figure 4. Free vibration experiments

Using fast Fourier transformation, time-dependent acceleration response taken from LabVIEW software after impact excitation was transformed

into the frequency domain to generate the frequency response functions (FRFs). The values of natural frequency were obtained from the amplitude information in the first peak of FRF curves. Then, the damping ratio (ξ) was calculated through half-power bandwidth method as follows (Kabir and Hoa 2011);

$$\xi = \Delta\omega / 2\omega_1 \quad (1)$$

where $\Delta\omega$ and ω_1 are the bandwidth and first mode natural frequency, respectively.

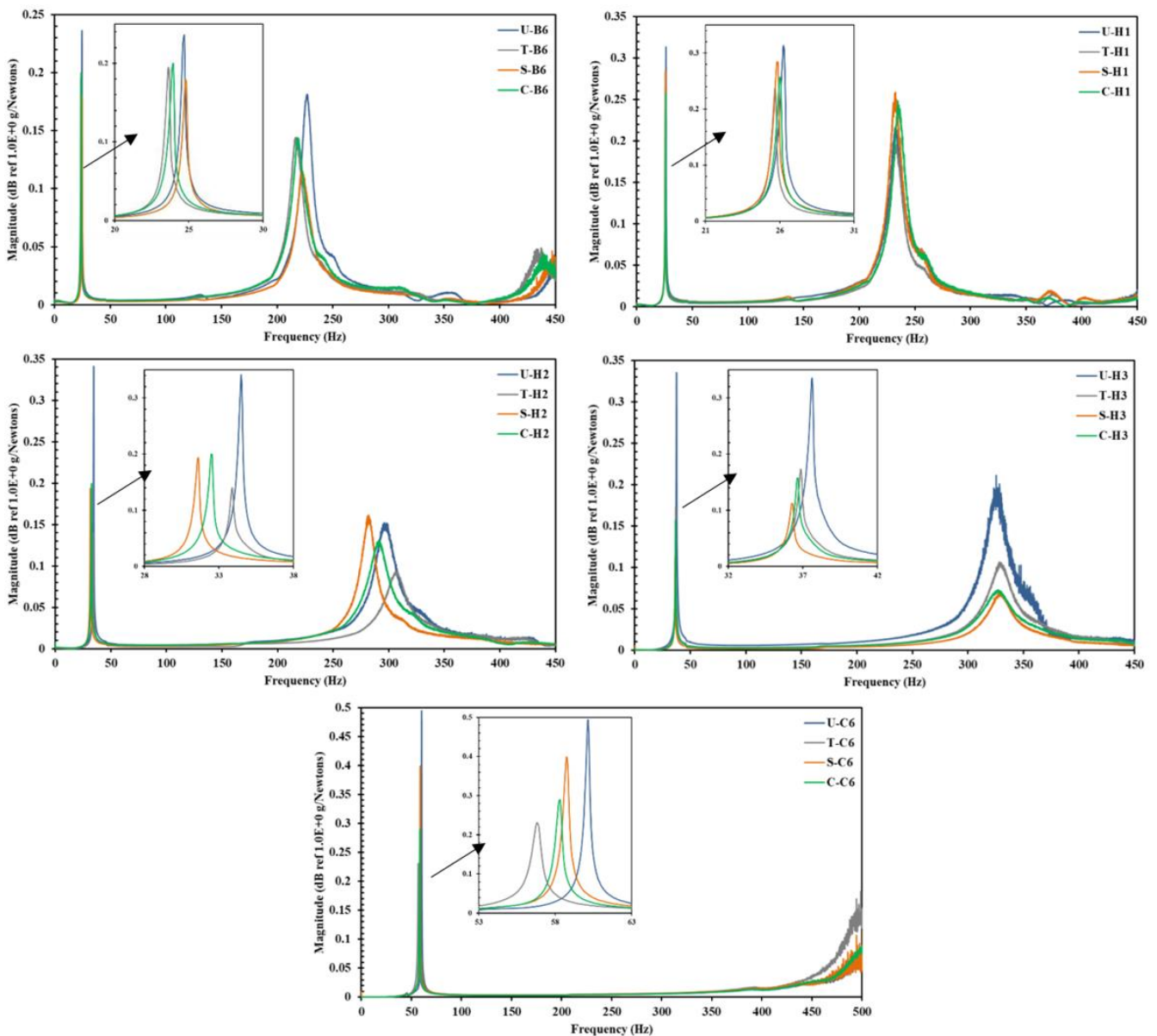


Figure 5. Frequency response curves of the hybrid/non-hybrid samples with different cut-outs

3. Results and Discussions

The curves of frequency response function (FRF) versus amplitude of the hybrid and non-hybrid samples with different cut-out shapes were given in Figure 5. The first mode which is seen as more dominant was used to determine the dynamic mechanical properties of composite laminates through the half-power bandwidth method. The first mode of natural frequency for all composite laminates were presented in Figure 6 to clearly follow the variations in natural frequency values. It is evident that cut-out shapes directly influence the frequency responses and both the hybrid and non-hybrid composite samples with cut-outs have lower natural frequency than the samples without cut-outs. The maximum reductions in natural frequency values as %6.11 and %4.66 were obtained from triangular samples for C and B non-hybrid samples, respectively. In most of the samples, square cut-outs led to the minimum decreases in natural frequency values compared to samples without cut-outs. The results obtained from the samples with circular cut-out remained the intervals of triangular and square cut-out. This can be attributed to the presence of the cut-outs that leads to reduction in the stiffness of composite laminates. Similar findings can be seen in the literature (Mandal *et al.* 2020, Jadhav and Deshmukh 2016). In a study related with the free vibration characteristics of glass fiber reinforced composites with arbitrary cut-outs, Mandal *et al.* (2020) declared that reduction in stiffness led to the frequency decreases for the small size of cut-outs.

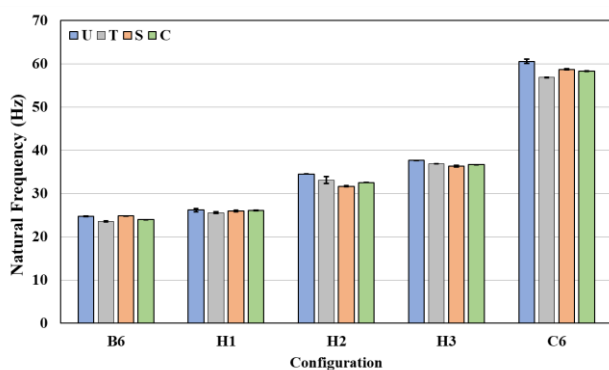


Figure 6. Natural frequencies of the hybrid/non-hybrid samples with different cut-outs

It is also seen that the characteristics of composite samples are significantly dependence on constituent materials. The incorporation of carbon fiber into basalt fiber reinforced laminates was resulted with the increases in frequency values as in (Bozkurt and Gökdemir 2018) and the maximum frequency was obtained from U-C6 samples as 60.55 Hz which was 6.51%, 3.12% and 3.88% higher than those of T-C6, S-C6 and C-C6 samples, respectively. It can be said that all samples with cut-out showed decreases in the natural frequency values. As seen from the literature, many factors such as bending stiffness, extensional stiffness, coupling stiffness, stiffness of the cross-section, and boundary conditions might have significant influences on the natural frequency of composite laminates (Venkateshappa *et al.* 2019, Jones 1998). Furthermore, the inclusion of carbon fiber content led to the significant increases in the natural frequency of basalt fiber reinforced laminates (B6) with or without cut-outs (Bozkurt and Gökdemir 2018). It can be said that the natural frequency of basalt fiber reinforced composites (B6) was increased with the carbon fiber hybridization. Compared to those of C-B6 samples, the increases in natural frequency of C-H1, C-H2 and C-H3 samples are 8.9%, 35.8% and 53.2%, respectively.

Damping ratio values of composite samples were presented in Figure 7. It was clearly seen that the presence of cut-outs was resulted with the increase in the damping characteristics of composite laminates for those of hybrid and non-hybrid samples. The composite samples with triangular cut-outs were exhibited the maximum damping ratios. T-B6, T-H1, T-H2, T-H3 and T-C6 samples had the damping ratio values of 0.006465, 0.006175, 0.005077, 0.004445 and 0.004106, respectively. The maximum damping ratio was obtained from the T-B6 samples and is 5.98% higher than those of U-B6 samples. Furthermore, all samples with cut-out showed the better damping ratio than samples without cut-out. This can be attributed to the decrease in stiffness of the material as a result of cut-out application. Thus, it is known that stiffness and damping are opponent properties and if there was an increase in one of them can be accompanied by a reduction in another (Lakes 2002). Due to the less stiff nature of basalt fiber,

the increase in basalt fiber content of hybrid laminates provided the enhancement in damping characteristics. Bozkurt and Gökdemir (2018) stated that the poor interfacial adhesion between basalt fiber and epoxy matrix led to an additional energy dissipation mechanism can be viewed as another source of increase in damping ratio. In comparison of cut-out shapes, minimum damping values were obtained from the samples with circular cut-outs. When compared to cut-out shapes with each other, the maximum reductions in damping ratio were determined as 3.37%, 5.02%, 10.28%, 8.26% and 11.47% for C-B6, C-H1, C-H2, C-H3 and C-C6 samples, respectively.

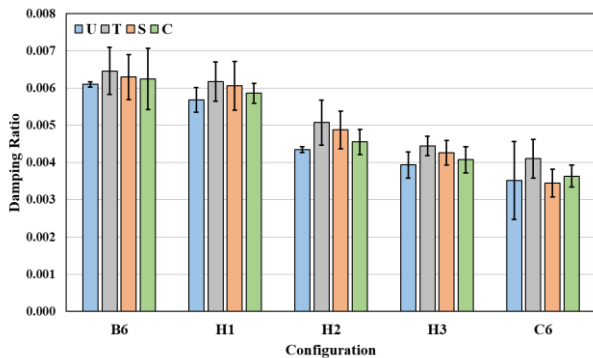


Figure 7. The damping ratio of the hybrid/non-hybrid samples with different cut-outs

For a better understanding for the effect of cut-out applications on the free vibration characteristics of the composites, the time-acceleration responses of the carbon fiber reinforced composite samples with or without cut-outs were presented in Figure 8. Amplitude-time decaying curves were recorded within the same time intervals (5 seconds) to make reliable comments on damping behaviors of the samples. The amplitude of oscillations for the samples without cut-out was occurred around 4s interval while the samples with triangular cut-outs showed the stabilization approximately 3s interval. This may be explained by a decrease in vibration energy dissipation along the longitudinal direction (Bozkurt *et al.* 2016) because the samples with triangular cut-out had the maximum reduction in cross-sectional area. Liang *et al.* (Liang *et al.* 2011) reported that the increase of effective damping could be led to decrease in dissipated energy employing amplitudes. Furthermore, the samples

with square or circular cut-outs showed shorter oscillation periods compared to the samples without cut-outs due to decrease in cross-sectional stiffness which resulted with increases in damping characteristics.

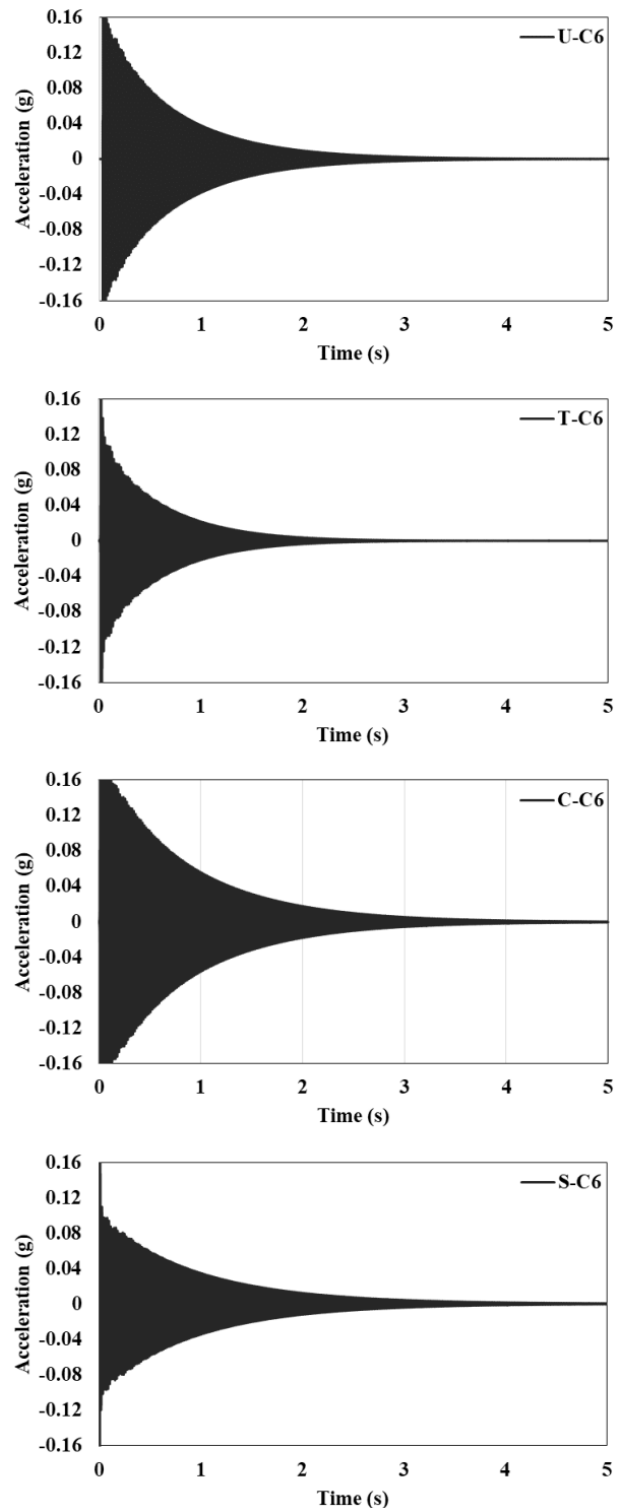


Figure 8. Time-acceleration response of carbon fiber reinforced composite laminates

4. Conclusions

In this study, the effects of cut-outs on the free vibration characteristics of basalt/carbon hybrid fiber composites were experimentally investigated. The results showed that cut-outs in the form of triangular, square and circular shapes have contribution on the improvement of damping characteristics of composite laminates.

- The maximum improvement in damping ratio was obtained from the triangular cut-outs. Even though the increase in damping values, the cut-outs led to decreases in natural frequency of the samples.
- It was also seen that fiber hybridization had remarkable impacts on vibration-damping response of composite laminates.
- The hybridization with basalt fiber were improved the damping capability of the carbon fiber reinforced laminates.

In conclusion, the employment of cut-outs can be a promising application to meet the vibration-damping requirements of an engineering system constructed with hybrid and non-hybrid fiber reinforced composite laminates.

5. References

- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y.O., Gemi, L., & Arslan, M.H., 2020. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, **249**, 112561.
- Bedon, C., 2019. Diagnostic analysis and dynamic identification of a glass suspension footbridge via on-site vibration experiments and FE numerical modelling. *Composite Structures*, **216**, 366-378.
- Bhudolia, S.K., Perrotey, P. and Joshi, S.C., 2017. Enhanced vibration damping and dynamic mechanical characteristics of composites with novel pseudo-thermoset matrix system. *Composite Structures*, **179**, 502-513.
- Bicos, A.S. and Springer, G.S., 1989. Vibrational characteristics of composite panels with cutouts. *AIAA journal*, **27(8)**, 1116-1122.
- Bozkurt, Ö.Y., 2017. Hybridization effects on tensile and bending behavior of aramid/basalt fiber reinforced epoxy composites. *Polymer Composites*, **38(6)**, 1144-1150.
- Bozkurt, Ö.Y. and Gökdemir, M.E., 2018. Effect of basalt fiber hybridization on the vibration-damping behavior of carbon fiber/epoxy composites. *Polymer Composites*, **39(S4)**, E2274-E2282.
- Bozkurt, Ö.Y., Bulut, M. and Özbek, Ö., 2016, March. Effect of fibre orientations on damping and vibration characteristics of basalt epoxy composite laminates. *In Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16)*.
- Bozkurt, Ö.Y., Erkliğ, A., and Bozkurt, Y.T., 2018. Influence of basalt fiber hybridization on the vibration-damping properties of glass fiber reinforced epoxy laminates. *Materials Research Express*, **6(1)**, 015301.
- Bulut, M., Bozkurt, Ö.Y., Erkliğ, A., Yaykaşlı, H. and Özbek, Ö., 2020. Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber-Reinforced Composites with Nanoclay Particles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **45(2)**, 1017-1033.
- Bulut, M., Erkliğ, A. and Doğan, N.F., 2017. On adhesive properties of perlite and sewage sludge ash with epoxy resin bonded single-strap repairs. *Materials Research Express*, **4(8)**, 085302.
- Draiche, K., Tounsi, A. and Khalfi, Y., 2014. A trigonometric four variable plate theory for free vibration of rectangular composite plates with patch mass. *Steel and Composite Structures*, **17(1)**, 69-81.
- Doğan, N.F., Bulut, M., Erkliğ, A., & Bozkurt, Ö.Y., 2019. Mechanical and low velocity impact characterization of carbon/glass hybrid composites with graphene nanoplatelets. *Materials Research Express*, **6(8)**, 085304.
- Duc, N.D., Seung-Eock, K., Cong, P.H., Anh, N.T. and Khoa, N.D., 2017. Dynamic response and vibration of composite double curved shallow shells with negative Poisson's ratio in auxetic honeycombs core layer on elastic foundations subjected to blast and damping loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, **133**, 504-512.

- Erkliğ, A., Bulut, M. and Yeter, E., 2013. Effects of cutouts on natural frequency of laminated composite plates. *Science and Engineering of Composite Materials*, **20(2)**, 179-185.
- Erkliğ, A., Bulut, M. and Yeter, E., 2014. Natural frequency response of laminated hybrid composite beams with and without cutouts. *Journal of Polymer Engineering*, **34(9)**, 851-857.
- Gemi, L., 2018. 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**, 217-232.
- Gemi, L., Köklü, U., Yazman, Ş., & Morkavuk, S. 2020. 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**, 107787.
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U., & Yazman, Ş. 2020. The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality. *Composite Structures*, **235**, 111737.
- Hachemi, M. and Hamza-Cherif, S.M., 2020. Free vibration of composite laminated plate with complicated cutout. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, **48(2)**, 192-216.
- Huang, C.Y. and Tsai, J.L., 2015. Characterizing vibration damping response of composite laminates containing silica nanoparticles and rubber particles. *Journal of Composite Materials*, **49(5)**, 545-557.
- Ilangovan, S., Kumaran, S.S. and Naresh, K., 2020. Effect of nanoparticles loading on free vibration response of epoxy and filament winding basalt/epoxy and E-glass/epoxy composite tubes: experimental, analytical and numerical investigations. *Materials Research Express*, **7(2)**, 025007.
- Jadhav, Y.G. and Deshmukh, P.V., 2016. Effect of cut-out shape on free vibration of composite plates. *International Journal Of Current Engineering And Scientific Research (Ijcesr)*, **3**, 48-53.
- Jones, R.M., 1998. Mechanics of composite materials. *CRC press. Taylor and Francis*, Philadelphia, USA.
- Kabir, A. and Hoa, S.V., 2011. Improvement of vibration damping and flexural fatigue property incorporating nanoclay into glass/epoxy composite. In *ICAF 2011 Structural Integrity: Influence of Efficiency and Green Imperatives* (pp. 155-165). Springer, Dordrecht.
- Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., 2016. Enhanced mechanical properties of unidirectional basalt fiber/epoxy composites using silane-modified Na⁺-montmorillonite nanoclay. *Polymer Testing*, **55**, 135-142.
- Kumar, S., Kumar, A. and Vanitha, C., 2019. Corrosion behaviour of Al 7075/TiC composites processed through friction stir processing. *Materials Today: Proceedings*, **15**, 21-29.
- Lakes, R.S., 2002. High damping composite materials: effect of structural hierarchy. *Journal of composite materials*, **36(3)**, 287-297.
- Liang, Z., Lee, G.C., Dargush, G.F. and Song, J., 2011. Structural damping: applications in seismic response modification (Vol. 3). *CRC press, Taylor & Francis Group*.
- Madenci, E., Özkılıç, Y.O. and Gemi, L., 2020. Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations. *Composite Structures*, **254**, 112806.
- Madenci, E., Özkılıç, Y.O., & Gemi, L., 2020. Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses. *Composite Structures*, **242**, 112162.
- Madenci, E., Özkılıç, Y.O., & Lokman, G., 2020. Theoretical investigation on static analysis of pultruded GFRP composite beams. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **8(3)**, 483-490.
- Madenci, E., and Ozutok, A., 2020. Variational approximate for high order bending analysis of laminated composite plates. *Structural Engineering and Mechanics*, **73(1)**, 97-108.
- Mandal, A., Ray, C. and Haldar, S., 2020. Experimental and Numerical Free Vibration Analysis of Laminated Composite Plates with Arbitrary Cut-Outs. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, **101(2)**, 281-289.

- Mondal, S., Patra, A.K., Chakraborty, S. and Mitra, N., 2015. Dynamic performance of sandwich composite plates with circular hole/cut-out: A mixed experimental–numerical study. *Composite Structures*, **131**, 479-489.
- Murugan, R., Ramesh, R. and Padmanabhan, K., 2016. Investigation of the mechanical behavior and vibration characteristics of thin walled glass/carbon hybrid composite beams under a fixed-free boundary condition. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **23(8)**, 909-916.
- Noor, A.K. and Burton, W.S., 1989. Stress and free vibration analyses of multilayered composite plates. *Composite Structures*, **11(3)**, 183-204.
- Oguz, Z.A., Erklig, A., & Bozkurt, Ö.Y., 2020. Degradation of hybrid aramid/glass/epoxy composites hydrothermally aged in distilled water. *Journal of Composite Materials*, 0021998320984237.
- Özbek, Ö., Bozkurt, Ö.Y., 2019. Hoop tensile and compression behavior of glass-carbon intraply hybrid fiber reinforced filament wound composite pipes. *Materials Testing*, **61(8)**, 763-769.
- Özbek, Ö., 2020. Axial and lateral buckling analysis of kevlar/epoxy fiber-reinforced composite laminates incorporating silica nanoparticles. *Polymer Composites*.
- Özkılıç YO, Madenci E, Gemi L., 2020. Tensile and compressive behaviors of the pultruded GFRP lamina. *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*. **4(4)**:169-75.
- Özkılıç, Y.O., Yazman, Ş., Aksoylu, C., Arslan, M. H., & Gemi, L., 2021. Numerical investigation of the parameters influencing the behavior of dapped end prefabricated concrete purlins with and without CFRP strengthening. *Construction and Building Materials*, **275**, 122173.
- Özütok, A., and Madenci, E. (2013). Free vibration analysis of cross-ply laminated composite beams by mixed finite element formulation. *International journal of structural stability and dynamics*, **13(02)**, 1250056.
- Ozutok, A., Madenci, E., & Kadioglu, F. (2014). Free vibration analysis of angle-ply laminate composite beams by mixed finite element formulation using the Gâteaux differential. *Science and Engineering of Composite Materials*, **21(2)**, 257-266.
- Özütok, A., and Madenci, E., 2017. Static analysis of laminated composite beams based on higher-order shear deformation theory by using mixed-type finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, **130**, 234-243.
- Poore, A.L., Barut, A. and Madenci, E., 2008. Free vibration of laminated cylindrical shells with a circular cutout. *Journal of Sound and Vibration*, **312(1-2)**, 55-73.
- Qatu, M.S., Sullivan, R.W. and Wang, W., 2010. Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000–2009. *Composite Structures*, **93(1)**, 14-31.
- Ramakrishna, C.S., Rao, Y.S.R., Murthy, A.S.D., Taranikanth, K. and Harishankar, B., 2021. Vibration behavior of graphite powder in carbon/basalt reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Roundi, W., El Mahi, A., El Gharad, A. and Rebière, J.L. (2017). Experimental and numerical investigation of the effects of stacking sequence and stress ratio on fatigue damage of glass/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, **109**, 64-71.
- Sinha, L., Das, D., Nayak, A.N. and Sahu, S.K., 2021. Experimental and numerical study on free vibration characteristics of laminated composite plate with/without cut-out. *Composite Structures*, **256**, 113051.
- Sivakumar, K., Iyengar, N.G.R. and Deb, K., 1999. Free vibration of laminated composite plates with cutout. *Journal of sound and Vibration*, **221(3)**, 443-470.
- Uslu, E., Gavgali, M., Erdal, M.O., Yazman, Ş. and Gemi, L., 2021. Determination of mechanical properties of polymer matrix composites reinforced with electrospinning N66, PAN, PVA and PVC nanofibers: A comparative study. *Materials Today Communications*, **26**, 101939.
- Venkateshappa, S.C., Kumar, P. and Ekbote, T., 2019. Free vibration studies on plates with central cut-out. *CEAS Aeronautical Journal*, **10(2)**, 623-632.

Wang, Y., Xie, K., Fu, T. and Shi, C., 2019. Vibration response of a functionally graded graphene nanoplatelet reinforced composite beam under two successive moving masses. *Composite structures*, **209**, 928-939.

Yasir, M., Amir, N., Ahmad, F., Ullah, S. and Jimenez, M., 2018. Effect of basalt fibers dispersion on steel fire protection performance of epoxy-based intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*, **122**, 229-238.

Effect of Montmorillonite Clay on Physical Properties of HDPE/ HGS Composites

Beril GÜMÜŞ^{1*}

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul

*Sorumlu Yazar, e-posta: beril.gumus@merklab.yildiz.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4185-4470>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 15.06.2021

Abstract

Recently, there has been an increasing interest in enhancing the physical properties of polymer nanocomposites. In the present study, the effect of montmorillonite (MMT) clay ratio (0, 1, 5, 10 and 15 wt.%) on the physical properties of the high-density polyethylene (HDPE)/ hollow glass spheres (HGS) composites were investigated. The hollow glass spheres ratio is 20% by weight. After the mixture obtained from the extruder was granulated, test specimens were produced using an injection molding machine. Physical tests were applied such as melt flow index (MFI), moisture content (MC), Vicat softening point (VSP), heat deflection temperature (HDT), Limit oxygen index (LOI). The nanoclay dispersion was examined by X-ray diffraction (XRD). Images of HDPE/HGS/MMT-clay composites were taken with Scanning electron microscopy (SEM). The results obtained show that heat deflection temperature, Vicat softening point, and melt flow index decreased gradually as the MMT-clay content increased. The LOI decreased with increase in the MMT-clay content from 0 to 15wt. %. MC increased with increase in the MMT-clay content from 0 to 1 wt. %. MC didn't change with further increasing of MMT-nanoclay content to 10 percent by weight. Then, MC increased with increase in the MMT-clay content from 10 to 15 wt. %.

Keywords

Nanoclay; Hollow glass spheres; High-density polyethylene; Physical properties

Montmorillonite Kilinin HDPE/ HGS Kompozitlerinin Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Öz

Son zamanlarda, polimer nanokompozitlerin fiziksel özelliklerinin geliştirilmesine yönelik artan bir ilgi vardır. Bu çalışmada, montmorillonit (MMT) kil oranının (ağırlıkça% 0, 1, 5, 10 ve 15) yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) / içi boş cam küreler (HGS) kompozitlerinin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. İçi boş cam küre oranı ağırlıkça % 20'dir. Ekstrüderden elde edilen karışım granüle edildikten sonra, bir enjeksiyon kalıplama makinesi kullanılarak test numuneleri üretildi. Erime akış indeksi belirleme testi (MFI), nem miktarı belirleme testi (MC), Vicat yumuşama noktası belirleme testi (VSP), yük altında eğilme sıcaklığı belirleme testi (HDT), sınırlayıcı oksijen indeksi belirleme testi (LOI) gibi fiziksel testler uygulandı. Nanokil dispersiyonu, X-ışını kırınımı (XRD) ile incelendi. HDPE / HGS / MMT-kil kompozitlerinin görüntüleri Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, MMT-kil içeriği arttıkça ısı çarpılma sıcaklığının, Vicat yumuşama noktasının ve erime akış indeksinin kademeli olarak azaldığını göstermektedir. LOI, MMT-kil içeriğinin ağırlıkça yüzde 0'dan 15'e yükselmesiyle azaldı. MC, MMT-kil içeriğinin ağırlıkça yüzde 0'dan 1'e artmasıyla artmıştır. MC, MMT-kil içeriğinin ağırlıkça yüzde 10'a yükseltilmesiyle değişmedi. Daha sonra, MC, MMT-kil içeriğinin ağırlıkça % 10'dan% 15'e yükselmesiyle arttı.

Anahtar kelimeler

Nanokil; Cam küreler; Yüksek yoğunluklu polietilen; Fiziksel özellikler

1.Introduction

Nanocomposites have been attractive in the past three decades owing to the improvement of their

properties. Clay platelets are convenient for polymers in order to develop new composites with

enhanced properties. Modified Montmorillonite-clay has been the most popular nanoclay type in the application of composites. The incorporation of nanoclay into polymers provides superior physical properties and flame resistance. The loading level is usually in the range of 3-6 wt. % for physical improvements. Hollow glass spheres (HGS) have been advantageous among the inorganic fillers for reinforcing polymer composites due to their lightweight property and sufficient strength. For this purpose, nanoclay, and HGS have been used to enhance the poor characteristics of polymers.

Firstly, Toyota Automobile Company used nano-clay in the polymer matrix in 1989. Since then, reinforcing polymers with nanoclay is extensive research in nanocomposites (El-Sheikhy and Al-Shamrani 2015, Turaev *et al.* 2009, Lei *et al.*, 2007, Kotal and Bhowmick 2015). The majority of previous studies revealed that the optimum ratio of nanoclay was about 3-10 percent by weight.

HDPE can be reinforced with reinforcements, such as nanoclay, hollow glass spheres to enhance the properties of HDPE (Yung *et al.* 2009, Liang and Li 2007, Patankar and Kranov 2009, Liu and Xu 2011). For instance, HGS addition can provide lightweight, high stiffness, high strength and insulation property, chemical stability and the addition of MMT can provide improved thermos-mechanical properties.

Singh *et al.* investigated the influence of different amounts of Sepiolite (1–10 wt. %) and compatibilizer (0–10 wt. %), i.e., PE-graft-maleic anhydride (PE-g-MA) on HDT values of HDPE based nanocomposites. In their laboratory study, they reported the HDT values of neat HDPE increased with increasing Sepiolite content. They also found out that storage modulus and loss modulus were lower than uncompatibilized nanocomposites at the same Sepiolite loading (Singh *et al.* 2017).

Kaştan *et al.* investigated the effect of modified MMT on PA6/HDPE/PE-g-MA (80/20/5). They reported that the MMT weight percent 3wt. % had the best result in the HDT test. They also reported that the Vicat softening point of composites decreased as the MMT content increased (Kaştan *et al.* 2017).

Mohan and Kanny developed hybrid HDPE composites consisting of a three-phase material system, namely, matrix (polymer), clay filler (0–3 wt. %) (as secondary reinforcement), and glass fiber GF (0–20 wt. %) (as a primary reinforcement) with and without polyethylene-grafted maleic anhydride gMA (0–3 wt. %) (as a compatibilizer). They also found out that the compatibilizer improved the

dispersion of clay particles in the polymer matrix and nanoclay addition in HDPE reduced the melt flow rate in part of their study (Mohan and Kanny 2012).

Sepet *et al.* investigated that Vicat softening temperature values decreased with increasing the wt. % of nanoclay content from 0 to 5. In work, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, and 5.0 wt. % of nanoclay as reinforcement and HDPE as polymer matrix were used to manufacture the nanoclay/HDPE nanocomposite. In their study, XRD patterns of the nanocomposites showed that the characteristic peak of the nanoclay was not detectable (Sepet *et al.*, 2016).

In the present study, the hollow glass spheres ratio was fixed 20% by weight taking into account the results of previous studies with respect to HDPE/HGS composites (Taşdemir and Yerleşen 2015). According to their study, HDPE polymer composites containing 5, 10, 15 and 20 wt. % hollow glass spheres were produced, and the properties of the composites were investigated. Taşdemir and Yerleşen found out that addition of HGS 20% by weight into HDPE matrix enhanced some mechanical properties such as higher elasticity modulus. Best mechanical properties were gained by the addition of HGS 20% by weight. The aim of this research is to find out the effect of MMT ratio on the properties of the HDPE/ HGS/ MMT composites. It was noticed that the physical properties of HDPE/ HGS/ MMT composites were affected by increasing clay content. Although some studies have been conducted on the reinforcement effect of MMT in thermoplastics such as polypropylene (PP) and polyethylene (PE), there have not been any studies reporting a comparison by reinforcing HDPE/ HGS composites with MMT.

2. Experimental Procedure

2.1 Materials and Composition

HDPE-based composites were produced. HDPE, known as Petilen YY (I 668 UV), was provided from Petkim, Petrokimya Holding A.S., Turkey. Its density is 0.970 g/cm³, melt flow index is 5.2 g/10 min at 190 °C-2.16 kg, yield strength is 28.0 MPa and notched Izod impact is 50 J/m. Hollow glass spheres were supplied from 3M Inc., USA. The average diameter and the density of hollow glass spheres are 20 microns and 0.46 g/cc respectively. Onium Ion Modified Montmorillonite Clay (CAS No. 1318-93-0 Montmorillonite clay 61789-80-8 Dimethyl Dialkyl, Ammonium) procured from Nanocor Inc., USA. This Surface Modified Clay consists of 55 ~ 65 wt% Dimethyl dialkyl(C14-18), Ammonium 35 ~ 45 wt%. Nanomer 1.44 P nanoclay is used for this study. The mean particle sizes are in the range of 15-20 µm.

Compositions of HDPE/HGS/MMT composites are given in Table 1.





Table 1. Compositions of the composites

Groups	HDPE (wt%)	HGS (wt%)	MMT (wt%)
1	80	20	0
2	79	20	1
3	75	20	5
4	70	20	10
5	65	20	15

Table 2 shows extrusion and injection conditions. Extrusion temperature was between 190-220 °C at 32-37 bar pressure, and the rotation rate was 25-35 rpm. Figure 1 shows the production steps of samples.

Table 2. Production conditions of the composites

Process	Unit	Extrusion	Injection
Temperature	°C	190-220	190-220
Pressure	bar	32-37	130-150
Screw speed	rpm	25-35	25

<p>Sample Preparation Step 1</p> 	
<p>(a) Densi DS-05 laboratory balance</p>	<p>Densi DS-05 laboratory balance (Capacity: 5kg) was used to measure the contents of mixture.</p>
<p>Sample Preparation Step 2</p>	
	<p>Mechanical premixing of solid compositions was done using a LB-5601 liquid-solids blender (The Patterson-Kelley Co., Inc. east Stroudsburg, PA - USA). The brand batch blender was used to premix solid compositions for 15 min.</p>
<p>(b) LB-5601 liquid-solids blender</p>	
<p>Sample Preparation Step 3</p>	
	<p>Samples with various proportions of HDPE/HGS/MMT composites granules were produced between 190-220 °C at 32-37 bar pressure, and a rotation rate of 25-35 rpm, with a Microsan co- rotating twin-screw extruder (Microsan Instrument Inc., Turkey).</p>
<p>(c) Microsan co- rotating twin-screw extruder (L/D ratio is 30, Ø25 mm)</p>	
<p>Sample Preparation Step 4</p>	
	<p>After extrusion, polymer composites were also dried in Binder vacuum oven (Binder, Germany) at 105 °C for 24 hours.</p>
<p>(d) Binder vacuum oven</p>	


<p>Sample Preparation Step 5</p>	<p>Subsequently, test samples were molded in injection molding machine. Injection temperature was between 190-220°C and pressure was 130-150 bar.</p>
	
<p>(e) Injection molding machine (Yonca Makine, Turkey)</p>	

Figure 1. Production steps of samples

2.2 Test Procedure

X-ray diffraction (XRD) analysis was carried out in a X-ray diffractometer Panalytical X’PERT PRO with CuKá radiation (45 kV, 40 mA) at room temperature. Heat deflection temperature (HDT) tests and Vicat softening temperature tests were carried out following ISO 75 standard and ISO 307 standard using CEAST 6521 HDT-Vicat tester. Melt flow index tests were done at 190 0C under 2.16 kg load according to ISO 1133 standard with Zwick 4100

MFI equipment. Moisture testing (MOI) was conducted as per ASTM D 6980 standard using Kern DBS 60-3 equipment. Limit oxygen index (LOI) values were measured as per ISO 4589 standard test method using Devotrans LOI equipment. SEM (Zeiss EVO LS 10; Carl Zeiss NTS, Germany) was used at 7.5 kV in order to investigate the distribution of microstructure

3. Results and Discussion

3.1 Morphology of HDPE/HGS/MMT Composites

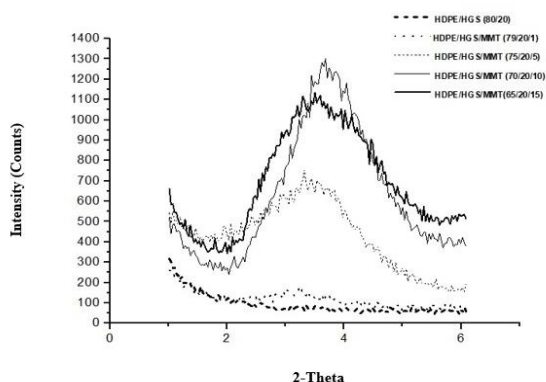


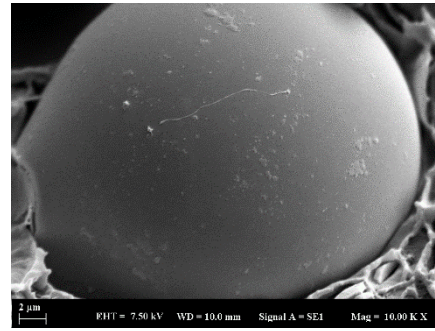
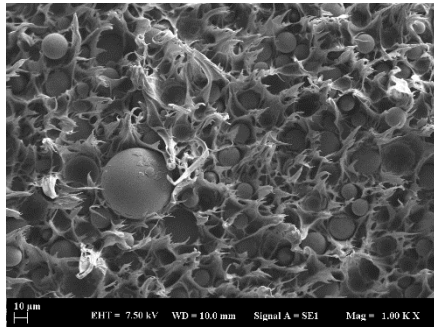
Figure 2. XRD patterns of HDPE/HGS/MMT composites

Figure 2 shows the XRD pattern for the samples scanned over the range 2θ=1 to 60. There is no significant shift to the left in loading 5 wt. % MMT or more. It is understood that optimum exfoliation of nano fillers was obtained when 1 wt. % MMT was loaded to the system.

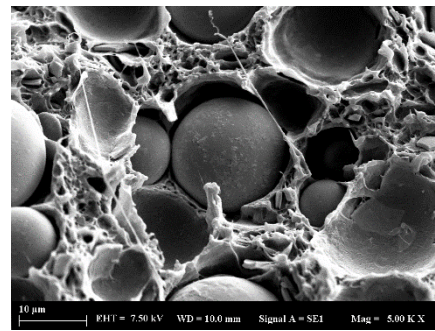
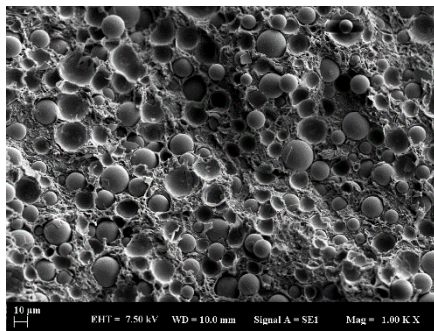
Table 3. Diffraction peak at 2θ and d-spacing

Groups	Clay Loading	Angle 2θ (Angle of Diffraction)	d-Spacing Å
2	1%	3.26°	27.06
3	5%	3.30°	26.74
4	10%	3.67°	24.08
5	15%	3.52°	25.06

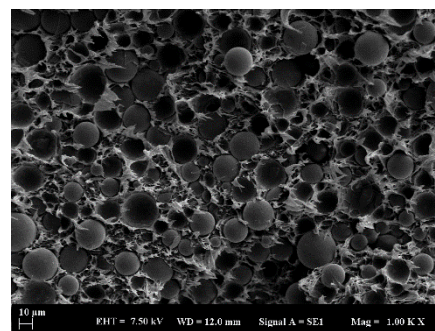
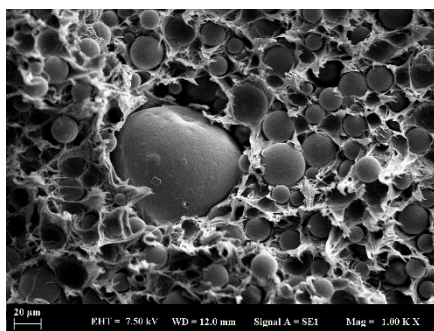
2θ = 3.26° was observed in the case of loading 1 wt. % MMT, but loading 15 wt. % MMT peak shifted to the right, which means agglomeration increases in the matrix. The diffraction peak at 2θ and d-spacing of all composites were summarized in Table 3.



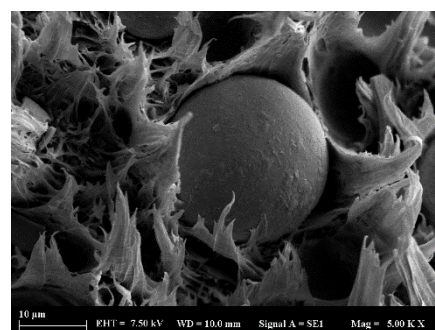
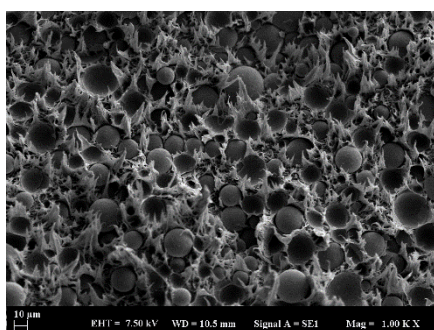
(a) HDPE/HGS/MMT (75/20/0)



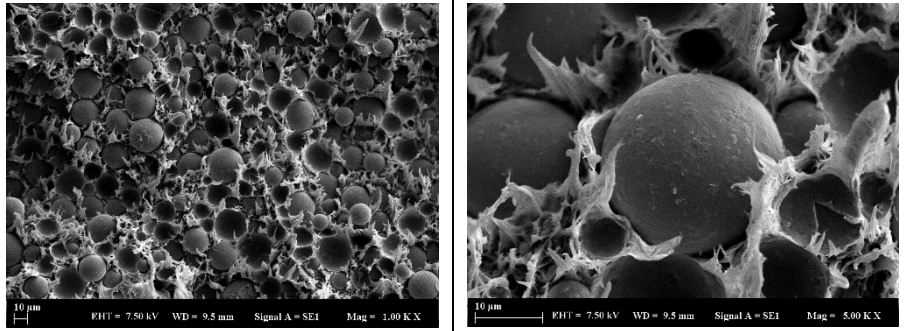
(b) HDPE/HGS/MMT (75/20/1)



(c) HDPE/HGS/MMT (75/20/5)



(d) HDPE/HGS/MMT (75/20/10)



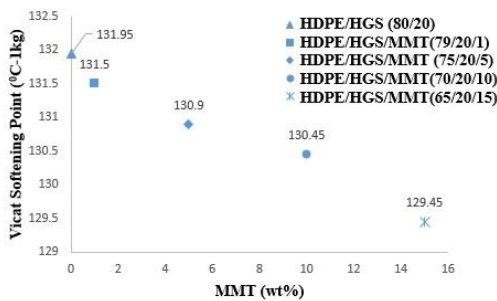
(e) HDPE/HGS/MMT (75/20/15)

Figure 3. SEM images of (a) HDPE/HGS/MMT (75/20/0), (b) HDPE/HGS/MMT (75/20/1), (c) HDPE/HGS/MMT (75/20/5), (d) HDPE/HGS/MMT (75/20/10), (e) HDPE/HGS/MMT (75/20/15)

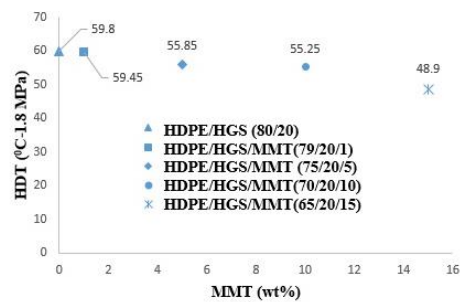
Figure 3 shows SEM images of HDPE/HGS/MMT composites with different percentages of MMT. The contrast and the boundaries can be seen clearly. The micrographs indicate that the HGS and MMT are homogeneously dispersed. The surfaces of hollow glass spheres are clean and smooth, and they are not broken because of the weak interfacial bonding between HGS and polymer matrix in the absence of a compatibilizer.

As can be seen from Figure 3, the adhesion between HGS and polymer matrix isn't strong. SEM images prove that as the MMT concentration increases, the interface between HGS and HDPE matrix aided by MMT presence. Noteworthy is the nanofilled polymer covers HGS more tightly.

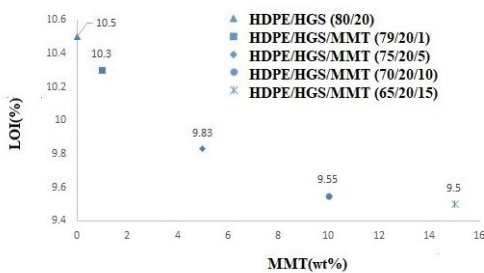
3.2 Physical properties of HDPE/HGS/MMT composites:



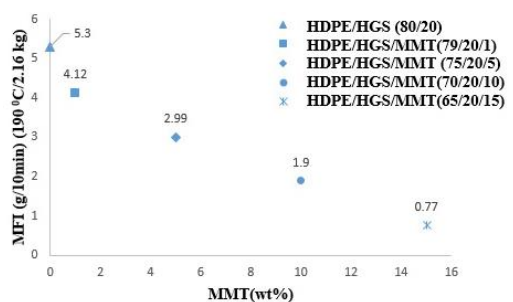
(a)



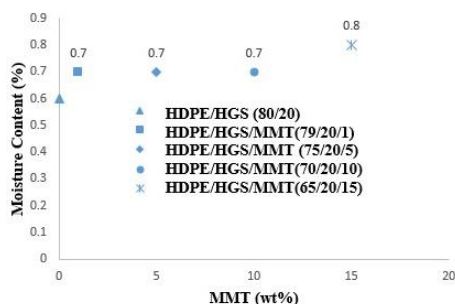
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 4. Physical properties of HDPE/HGS/MMT composites

VSP is useful in quality control, development, characterization of materials and comparing the heat softening qualities of thermoplastic materials. The relation between the Vicat softening point and the weight percent of MMT is shown in Figure 4a. As seen from Figure 4a, the Vicat softening point of composites without MMT has the highest value (131.95). The Vicat softening point of the three different samples (with 1, 5, and 10 wt.% of MMT) is measured as 131.5, 130.9 and 130.45°C respectively. Vicat softening temperature of composites with 15 wt. % MMT is lowest at 129.45 °C. Vicat softening temperature of HDPE/HGS/MMT composites decreases slightly compared with HDPE/HGS. Compared with the VSP of HDPE/HGS, the VSP decreased by 1.9% for the composites with 15 wt% MMT.

Heat deflection temperature is the temperature at which a thermoplastic sample deforms under a specific load. HDT test is commonly used for quality control and screening and ranking materials for short-term heat resistance. This property is helpful in the product design, engineering and manufacturing of thermoplastic components. The relation between the HDT and the weight percent of MMT of composites is shown in Figure 4b. The HDT of the composites decreases as the MMT amount increases from 0 to 15 wt %. The HDT of the three different samples (with 1, 5 and 10 wt% of MMT) are measured as 59.45, 55.85 and 55.25 °C respectively. The maximum HDT is observed at Group1 (HDPE/HGS) as 59.80 °C. Comparing with the HDT of HDPE/HGS, the HDT decreased by 18% for the composites with 15 wt % MMT.

Surface spreading of flame, fuel penetration, and oxygen index are the variables that fire performance of any polymer depends on. The limiting oxygen index (LOI) is the minimum amount of oxygen that will support combustion (Chawla 2012). Matrix type and amount, the quantity of fire-retardant additives, type and amount of reinforcement (if any) are the parameters that affect the degree of flammability of a polymer.

LOI is used to evaluate the flame retardancy of polymer composites. The oxygen index indicates the minimum concentration of oxygen that must be present in the air in order to support flaming combustion of a plastic (after ignition). Highly flammable polymer composites have a low oxygen index, and less flammable polymer composites have high values. Figure 4c shows the relation between the LOI and the weight percent of the MMT. The LOI of HDPE/HGS/MMT composites decreases as the MMT amount increases from 0 to 10 wt. %. However, LOI does not change with further increase of MMT content to 15 % by weight. The LOI of the three different samples (with 1, 5 and 10 wt% of MMT) are measured as 10.3, 9.83 and 9.55 % respectively. The LOI of HDPE/HGS is 10.5 %. The minimum LOI is observed at 15 wt% of MMT amounts as % 9.5. Comparing with the LOI of HDPE/HGS, the LOI decreased by 9.52 % for the composites with a 15 wt % MMT.

The melt flow index is- also known as the melt flow rate. MFI measures the flow rate of thermoplastic material in its molten state through a die under prescribed temperature /load conditions (Shah 1998). MFI is a measure for- material viscosity and an inverse measure of molecular weight. When

comparing the same class polymers, a lower melt flow rate -corresponds to a higher molecular weight and/or less branching. The melt flow rate test is a quality control tool in manufacturing to verify incoming material and assess its processability in terms of processing techniques. It is globally used in the polymer industry product development for comparing new materials. The relation between MFI and the percent of the MMT is shown in Figure 4d. As shown in Figure 4d, the melt flow index values of composites decrease while the MMT amount increases from 0 to 15 wt %. The MFI of the three different samples (with 1, 5 and 10 wt% of MMT) are measured as 4.12, 2.99, and 1.90 g/10 min respectively. The MFI of HDPE/HGS (80/20) is 5.30 g/10 min. The minimum melt flow index is 0.77 g/10 min observed for HDPE/HGS/MMT (65/20/15). Comparing with the MFI of HDPE/HGS (80/20), the MFI decreased by 85% for the HDPE/HGS/MMT (65/20/15) composites. Mohan and Kanny observed similar results with melt flow index of glass fiber and MMT reinforced HDPE composites. The addition of clay reduced melt flow rate of the composites (Mohan and Kanny 2012).

4. Conclusions

Physical tests were applied such as melt flow index, moisture content, Vicat softening point, heat deflection temperature, limit oxygen index. The nanoclay dispersion was examined by X-ray diffraction. Also, SEM examination was conducted to evaluate the microstructure of hollow glass spheres and nanoclay as well as material distribution in these experiments.

The following results were obtained:

It is understood from the XRD data that optimum exfoliation of nanofillers was obtained when 1 wt.% MMT was loaded to the system. VSP, HDT, MFI of HDPE/HGS/MMT composites decreased as the MMT content increased.

Vicat softening point reflects VSP is used for comparing the heat softening qualities of HDPE/HGS/MMT composites. The VSP reflects the softening point to be expected when a material is used in an elevated temperature application. The data obtained from this test showed VSP of HDPE/HGS/MMT composites decreased as the

In polymer composites, the moisture content is essential for manufacturing these materials and assuring their process quality. Moisture affects the process ability of almost all polymer composites. The amount of moisture content was calculated in terms of loss in weight of the specimens. As seen from Figure 4e, the moisture content of HDPE/HGS (80/20) composites increases as the MMT amount increases from 0 to 1 wt %. The moisture content of the three different samples (with 1, 5, and 10 wt% of MMT) is measured as 0.7 %. The moisture content of HDPE/HGS is 0.6 %. The maximum moisture content is observed at the 15 wt % of MMT amount as 0.8%. Comparing with the moisture content of HDPE/HGS, the moisture content increased by 33 % for HDPE/HGS/MMT (65/20/15).

Although the incorporation of nanoclay into polymers improves physical performance and flame resistance, significant improvement of the properties is not observed in this study.

MMT content increased. There was not a significant change among VSP values of the composites.

HDT indicates at what temperature materials start to "soften" when exposed to a fixed load at elevated temperatures. HDT of HDPE/HGS/MMT composites decreased slightly as the MMT content increased.

The limited oxygen index test is the most useful flammability tests in order to select thermoplastics in terms of flammability. The limit oxygen index of HDPE/HGS/MMT composites decreased as the MMT concentration increased from 0 wt. % to 15 wt. %. This means that lower oxygen density is required to initiate and sustain combustion of the composites after the addition of MMT into HDPE/HGS composites.

MFI of the HDPE/HGS composites decreased with the nanoclay loading. In HDPE/HGS/MMT composites, MFI varied as a function of nanoclay content. The result showed that the MFI of the HDPE/HGS composites was higher than that of the nanoclay-reinforced HDPE/HGS composites.

The moisture content of HDPE/HGS polymer composites increased by the addition of 1 wt. % MMT. More MMT content from 1 wt. % to 10 wt. % by weight did not change the moisture content but 15 wt. % MMT addition increased the moisture content values of the composites.

Loading MMT into HDPE/HGS composites was expected to enhance the physical properties of composites. Nevertheless, as a result of experiments, it is observed that there was not any significantly enhanced property. This result may

have revealed because compatibilizer was not used in this study. The compatibilizers such as MA-g-PE (maleic anhydride- graft- polyethylene) can provide solid interfacial bonding among MMT, HGS, and polymer matrix and more homogenous dispersion of additives. As a result of this, enhanced properties can be obtained with a compatibilizer. Further studies are needed to clarify this point. The composites will be examined after the addition of a compatibilizer such as polyethylene-grafted maleic anhydride.

References

- Chawla K.K., 2012. Composite Materials. Springer Verlag New York, 80.
- El-Sheikhy R and Al-Shamrani M., 2015. On the Processing and Properties of Clay/ Polymer Nanocomposites CPNC. *Latin American Journal of Solids and Structures*, **12**, 385-419.
- Kaştan A., Yalçın Y., Ünal H. and Talaş Ş., 2017. Nanokil katkılı poliamid 6/yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin termal özelliklerinin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **32:1**, 97-107.
- Kotal M and Bhowmick A.K., 2015. Polymer nanocomposites from modified clays: Recent advances and challenges. *Progress in Polymer Science*, **51**, 127-187.
- Lei Y., Wu Q., Clemons M.C., Yao F and Xu Y., 2007. Influence of Nanoclay on Properties of HDPE/Wood Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **106**, 3958-3966.
- Liang J.Z and Li F.H., 2007. Heat transfer in polymer composites filled with inorganic hollow microspheres: A theoretical model. *Polymer Testing*, **26**, 1025-1030.
- Liu Sung-Po and Xu Jia-Fa, 2011. Characterization and mechanical properties of high density polyethylene/silane montmorillonite nanocomposites. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **38**, 734-741.
- Mohan T.P and Kanny K., 2012. Effect of nanoclay in HDPE-glass fiber composites on processing, structure, and properties. *Advanced Composite Materials*, **21:4**, 315-331.
- Patankar S. N. and Kranov Y.A., 2009. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability. *Materials Science and Engineering: A*, **527**, 1361-1366.
- Sepet H., Tarakcioglu N and Misra R., 2016. Investigation of mechanical, thermal and surface properties of nanoclay/HDPE nanocomposites produced industrially by melt mixing approach. *Journal of Composite Materials*, **50(22)**, 3105-3116.
- Shah V., 1998. Handbook of Plastics Testing Technology. John Wiley & Sons, Inc., 174.
- Singh V. P., Vimal K.K., Shashikant S., Kapur G.S. and Choudhary V., 2017. Polyethylene/sepiolite clay nanocomposites: Effect of clay content, compatibilizer polarity, and molar mass on viscoelastic and dynamic mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, **134**, Issue 33, 1-13.
- Taşdemir M. and Yerleşen U., 2015. Study on the friction and wear behaviors of modified HDPE/GLASS SPHERES Composites. *Romanian Journal of Materials*, **45(1)**, 59-66
- Turaev E.R., Khashirova S.Yu and Bedanokov A. Yu, Dzhangurazov B. Zh., Mikitaev A.K., 2009. Nanocomposite materials based on high density polyethylene with increased thermomechanical and physicomechanical properties. *Plasticheskie Massy*, **9**, 11-14.
- Yung K. C., Zhu B.L. and Yue T.M., Xie C.S., 2009. Preparation and properties of hollow glass microsphere-filled epoxy-matrix composites. *Composites Science and Technology*, **69**, 260-264.

Polaritonic Behaviors of SiC, cBN and GaN for Spectrally-Selective Nano-Optics Applications

Elif Begüm ELÇİOĞLU

Eskişehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 26555, Eskişehir, Turkey

e-mail: ebelcioglu@eskisehir.edu.tr. ORCID ID: 0000-0002-1005-4294

Geliş Tarihi: 02.02.2021

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Abstract

Advances in nanotechnology enables building systems and devices with outstanding properties and functions, which makes the material aspect critically important. Materials supporting surface phonon polaritons with their resonances located in the infrared range is interesting for radiation-based energy applications, with lower optical losses exhibited compared to plasmonic materials (i.e., metals). In this work, polaritonic behaviors of three prominent phononic materials, i.e., SiC, GaN, and cBN are studied. Polaritonic figure of merit relations are analytically solved and interpreted along with the polariton propagation lengths and penetration depths. Results obtained for single material-vacuum interface revealed the highest peak magnitude of overall polaritonic figure of merit for SiC, followed by cBN, and GaN; with these merits strong dependences on materials transverse optical phonon frequencies and resonance frequencies. The results highlight the selection of the proper material to work optimally in the desired spectral range.

Keywords

Surface phonon polaritons; Figure of merit; Silicon carbide, Gallium nitride; Cubic boron nitride.

SiC, cBN ve GaN'ün Spektral-Seçici Nano-Optik Uygulamalar İçin Polaritonik Performanslarının Belirlenmesi

Öz

Nanoteknolojideki gelişmeler neticesinde üstün özellik ve fonksiyonlara sahip sistem ve cihazların üretimi ile, söz konusu sistemlerde kullanılacak malzemelerin seçimi kritik öneme sahip hale gelmiştir. Yüzey fonon polaritonlarını destekleyen ve rezonansları kızılötesi bölgede olan malzemeler, plazmonik alternatiflerine göre (ör: metaller) daha düşük optik kayıplar sebebiyle de ışınım tabanlı enerji uygulamaları için önem taşımaktadır. Bu çalışmada, literatürde öne çıkan üç fononik malzeme olarak SiC, GaN ve cBN'ün polaritonik davranışları incelenmiştir. Polaritonik performans katsayıları analitik olarak çözülmüş ve elde edilen polariton yayılma uzunluğu ve nüfuz derinliği sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Malzeme-vakum arayüzü için elde edilen sonuçlar, genel polaritonik performans değerinin SiC için en yüksek olduğunu, SiC'ü sırasıyla cBN ve GaN'ın takip ettiğini ve bu performans göstergelerinin malzemelerin transvers optik fonon frekansı ve rezonans frekansına bağlılığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, ilgililenen spektral aralıkta optimal performansla çalışacak malzeme seçiminin önemine atıf yapmaktadır.

Anahtar Kelimeler

Yüzey fonon polaritonları; Performans katsayısı; Silisyum karbür; Galyum nitrid; kübik bor nitrid.

1. Introduction

With the improved manipulation, handling, and fabrication of materials at the micro and nanoscale, the distinctive properties and functions of micro- and nanomaterials have become increasingly important for available and potential technological applications. Energy use with lowest possible waste and highest possible efficiency has reached to the

level necessitating an urgent action to be taken due to environmental consciousness and limited sources. Thus far, this has motivated researchers to take a look at the bottom as Richard P. Feynmann suggested in his paper (Feynmann 1960) to see potential ways of employing nanomaterials, to improve efficiencies and sensitivities of processes. Thermal radiation becomes dependent on the

distance between heat-exchanging objects when they are separated by a distance smaller than the dominant emitted wavelength, i.e., $d < \lambda$ (Howell *et al.* 2021). In this case, the regime of radiative transfer is named the near-field (NF), for which the local density of electromagnetic states (LDOS) and consequently the amount of the transferred heat significantly exceeds the blackbody limit (Didari and Mengüç 2017). This increase depends on the material type of the objects, the distance between them (d), their temperatures, the environment they are held in, their shapes (Didari and Mengüç 2015) and surfaces (Chen and Xuan 2015), to name a few variables. The radiative transfer in the NF may find applications in areas including energy harvesting such as NF-thermophotovoltaics (Elçiöğlü 2018), tip-based applications such as nano-manufacturing (e.g., as described by (Dönmezer 2009, Dönmezer *et al.* 2010), material characterization (e.g., with tunneling microscopy), and radiation-based thermal rectification (Park and Zhang 2013). So far, the near-field radiative transfer (NFRT) has been investigated experimentally and theoretically to unfold the mechanisms involved in this increased heat transfer. The micro-nano fabrication techniques also enabled optimizing materials to end up with higher LDOS, higher NFRT, and higher performance (e.g., as shown by (Didari and Mengüç 2017, Didari *et al.* 2018a)).

The main mechanism that makes NFRT different from that at the conventional scale (far-field, FF) is the contribution of surface modes, whose impact is negligible in the FF, as these surface (evanescent) waves having a decay length of around a wavelength (Francoeur 2010) making their contribution to FF radiation (e.g., for the objects separated by a distance much larger than the dominant emitted wavelength) negligible. In the NF, these evanescent modes can dominantly be harvested upon proper system configuration and setting. Figure 1 shows the generic NF – FF distinction based on a plane surface of a smooth slab.

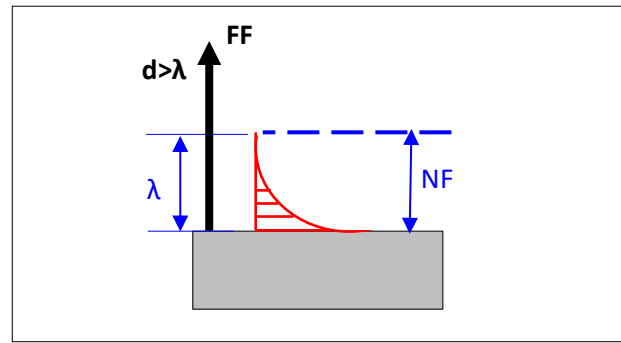


Figure 1. Near-field and far-field of a material, adapted from (Francoeur 2010).

Surface polaritons as excitations with the incident electromagnetic field, also propagate along the interface of two objects (depending on the type of materials) with decaying evanescent field in both (Francoeur 2010). The type of surface polaritons that contribute to the NFRT is surface plasmon polaritons for metals and semiconductors, and surface phonon polaritons in polar materials.

The main configurations studied in terms of the NFRT are plate-plate, sphere-plate, and sphere-sphere, all of which includes objects with a finite temperature gradient separated by a sub-wavelength distance. The most commonly investigated system setting has been parallel plates which holds potential for NF energy conversion and harvesting. The LDOS and NFRT have been investigated by covering a wide range of materials and system settings (e.g., separation, temperatures, etc.) The formulations of NFRT (as presented by (Francoeur and Mengüç 2008, Basu 2016), among others) reveal that once the separation between objects and their temperature are set, the material selection plays the major role in enhancing, or suppressing (Zhao *et al.* 2012) the NFRT. The parallel-plates configuration consists of two materials facing one another and separated by a vacuum gap. In this regard, understanding the importance of the material from its polaritonic performance at the material-vacuum interface is important.

SiC, cBN, and GaN support surface phonon polaritons in the IR, and as oppose to their plasmonic counterparts, they exhibit lower optical losses (Caldwell *et al.* 2015). This phenomenon is expected to cause a quasi-monochromatic spectral

radiative heat flux in the NF, potentially leading to higher performance (Francoeur 2010). It has been shown that the spectral NFRT flux between pairs of SiC, cBN, and GaN in parallel plates configuration exceeds the blackbody limit by orders of magnitudes (e.g., as mentioned by (Elçioğlu *et al.* 2017, Francoeur 2015) among others).

From a more materials-based point of view, performance measures for systems utilizing surface polaritons have been considered useful in conveniently assessing performance. The term figure of merit stands for a quantitative performance indicator (for a material or a system) that can be obtained more easily and conveniently than performing a whole system treatment. This applies to systems utilizing surface polaritons as well, generally by considering energy carried by polaritons, as well as their propagation and confinement. Maier (2006) mentioned a quality factor, Q , which was defined as the ratio of the energy stored to the loss per cycle; and for metals, Q was limited by the dissipative losses inside the material. It was shown that electromagnetic energy could be confined inside plasmonic cavities far below the diffraction limit, and a case study for Au half spaces was presented. More detailed figures of merit were provided for both surface plasmon polaritons and surface phonon polaritons by Caldwell *et al.* (2015) and comparisons were carried out to assess phononic and plasmonic materials performances by accounting for the quality factor values, locations of electrostatic resonances, and damping times. They presented figure of merit values for certain polar dielectrics, metals, metal alloys, and doped semiconductors. Berini (2006) proposed three figures of merit to quantify the spectral response of plasmon waveguides. The definition was based on a benefit-to-cost ratio where benefit was the confinement of surface plasmons, and the cost was the attenuation of them. Defining a figure of merit was considered important, since the confinement and attenuation are correlated, and there was a trade-off between them. Three figures of merit were defined for surface plasmons for a single-interface, metal slab bounded by dielectric, and dielectric slab bounded

by metal cases. Configurations with Ag and SiO₂ were considered, and their figures of merit were calculated. Buckley and Berini (2007) studied three figures of merit for 2D surface plasmon waveguides and considered different shaped (narrow, wide, thin, thick) metal (Au, Ag, Al) stripes (as one, two, three, and cladded) as the configuration. Each metal considered exhibited their highest performance at a wavelength region specific to them. Ordonez-Miranda *et al.* (2017) developed a polaritonic figure of merit expression and provided explicit and analytical expressions for (i) single interface, and (ii) suspended thin film cases. These polaritonic figure of merits are functions of the configuration (i or ii) and the material permittivity. They also analyzed the three polaritonic figures of merit they derived considering a single interface between (i) a SiC thin film-dielectric interface, and (ii) suspended SiC thin film cases, considering two different temperatures, 295 K and 686 K, for SiC's Drude-Lorentz permittivity terms. They concluded that for SiC-dielectric interface case, the surface phonon polaritons carried more energy at around transverse optical phonon frequency (ω_{TO}) of SiC.

In order to investigate polaritonic performance from materials point of view, the fundamental material-vacuum interface case has been considered in this work. The calculation performed by Ordonez-Miranda *et al.* (2017) for SiC (at 295 K) has been repeated in this work for comparison purposes against the polaritonic figure of merits of cBN and GaN calculated in this current work. In this way, it is aimed to present an assessment on the polaritonic behaviors of these three very common NFRT system component, and to highlight these materials performance in spectrally selective potential nano-optics applications. For this purpose, the polaritonic figure of merit expressions as developed by (Ordonez-Miranda *et al.* 2017) have been used. By analytically solving these relations, both the energy (phonon thermal conductivity) and the phonon propagation and confinement aspects were highlighted along with the phonon propagation length and penetration depth results. To the best of the authors literature review, this paper is to first to

calculate and assess the polaritonic figures of merit of cBN and GaN, and compare to those of SiC.

2. Material and Methodology

2.1. Methodology

This work has an analytical approach in determining the polaritonic figure of merit of cBN, and GaN and comparing them with those of SiC (as previously presented by Ordonez-Miranda *et al.* (2017)) and recalculated here for comparison purposes). Ordonez-Miranda *et al.* (2017) derived explicit analytical formulations for polaritonic figure of merit for both material-dielectric interfaces and suspended films. Here, a material-vacuum interface is considered, since vacuum environment is crucial to realize NFRT as the dominant heat exchange mechanism. The polaritonic figure of merit Z is the product of Z_e and Z_p , which respectively stand for the energy and propagation and confinement aspects, and defined as in Eq. (1) for material-vacuum interface (Ordonez-Miranda *et al.* 2017):

$$Z_e = \frac{\chi^2}{2\varepsilon_i}, Z_p = \frac{\chi}{\varepsilon_i} (\varepsilon_i \eta_- - \varepsilon_r \eta_+), Z = Z_e \cdot Z_p \quad (1)$$

In Eq. (1), ε_i and ε_r are respectively the imaginary and real parts of the relative permittivity of the film material. χ and η_{\pm} are defined as in Eq. (2) and (3) (Ordonez-Miranda *et al.* 2017):

$$\chi = \sqrt{|\varepsilon||\varepsilon + 1| + |\varepsilon|^2 + \varepsilon_r} \quad (2)$$

$$\eta_{\pm} = \sqrt{1 + \varepsilon \mp (1 + \varepsilon_r)} \quad (3)$$

The penetration depth (δ) and the propagation length (Λ) of the surface phonon polaritons are calculated as in Eq. (4) and (5) (Ordonez-Miranda *et al.* 2017):

$$\delta = \frac{1}{2\text{Re}(-k_0\varepsilon/\sqrt{-1-\varepsilon})} \quad (4)$$

$$\Lambda = \frac{1}{2\text{Im}\left[k_0\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)}\right]} \quad (5)$$

In Eqs. (4) and (5), Re and Im denotes the real and imaginary parts of the corresponding parameter, while $k_0 = \omega/c$ where c stands for the speed of light in vacuum. It is important to note that Eqs. (1-5) are here written specifically for dielectric material-vacuum interface, and their primary versions applicable to different configurations/cases are provided by Ordonez-Miranda *et al.* (2017).

The materials studied in this work (SiC, GaN, cBN) are known for their phononic behaviors. Polar materials support surface phonon polaritons in the IR and THz range, while exhibiting lower optical losses compared to plasmonic materials (i.e., metals) (Caldwell *et al.* 2015). Hence, realizing the behavior and performance of these common phononic materials is of importance for applications involving sub-diffraction confinement (Caldwell *et al.* 2015) and photon tunneling in the IR and THz spectral ranges.

2.2. Materials Studied in this Work

Plasmonic materials (e.g., metals) have had an important place in nano-photonics field. On the other hand, the optical losses associated with them limit their performances (Caldwell *et al.* 2015). Polar materials are known to support surface phonon polaritons (Narayanaswamy and Chen 2003) in the IR and THz range (Huber *et al.* 2008), and silicon carbide (SiC), cubic boron nitride (cBN), and gallium nitride (GaN) are among the leading phononic materials. Generation of surface phonon polaritons have found potential in microscopy and thermal emission applications, and phononic materials mostly exhibit high-temperature stability, and tunable polaritonic properties (Huber *et al.* 2008).

SiC is a wide bandgap semiconductor with high temperature stability (with a melting temperature >3000 K), high rigidity, high chemical and physical resistance (Huseynov 2020), and high breakdown field (Wondrak *et al.* 2001). GaN, similar to SiC, has high breakdown voltage and high electron velocity,

and is considered suitable in high power and high frequency applications (Mishra *et al.* 2008). GaN, as a nitride-semiconductor is also suitable for high temperature applications due to its wide energy bandgap and low carrier concentration in its undoped form (Pearton *et al.* 2002). For high-power electronics, the operating temperatures for 4H-SiC, 6H-SiC, and cBN were reported to be around 1230 K, 1200 K, and 1250 K, respectively (Lebedev and Chelnokov 1999). Apart from their individual usage, SiC and GaN can be paired for heteroepitaxial growth of GaN on SiC substrates (Talwar 2004). Cubic BN is the second hardest material and known to exhibit good thermal and chemical stability (Sharma *et al.* 2020). Bulk cBN crystals can also be doped to prepare p-type and n-type cBN (Litvinov *et al.* 1998), to fine-tune its properties. Due to high hardness of cBN, machining processes has been one of its prominent applications. These features combined with their phononic character makes SiC, GaN, and cBN highly worthy of investigation for nano-optics, nano-sensing, and nano-energy applications.

The frequency-dependent dielectric function of the materials is defined by the Drude-Lorentz Model, as in Eq. (6):

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty \left(\frac{\omega^2 - \omega_{LO}^2 + i\Gamma\omega}{\omega^2 - \omega_{TO}^2 + i\Gamma\omega} \right) \quad (6)$$

In Eq. (6), ω stands for the angular frequency, while ε_∞ , ω_{LO} , ω_{TO} , and Γ stand respectively for high frequency dielectric constant, longitudinal optical phonon resonance frequency, transverse optical phonon frequency, and damping factor. Values of these optical constants are provided in Table 1.

Table 1. Optical constants of the studied materials.

Material	ε_∞	ω_{LO} (rad/s)	ω_{TO} (rad/s)	Γ (rad/s)
SiC*	6.26	1.849x10 ¹⁴	1.500x10 ¹⁴	0.56x10 ¹²
GaN**	5.3	1.41 x10 ¹⁴	1.06 x10 ¹⁴	0.0152 x10 ¹⁴
cBN***	4.46	2.4551x10 ¹⁴	1.9887x10 ¹⁴	9.9512x10 ¹¹

Constants are taken from *Ordonez-Miranda *et al.* (2017), for 295 K, ** Didari *et al.* (2018b), and *** Narayanaswamy and Chen (2003).

3. Results and Discussions

The overall polaritonic figure of merit (Z) calculated as in Eq. (1) for SiC, cBN, and GaN is plotted with respect to the angular frequency in Figure 2 (a). Figure 2 (b) is an alternate but more detailed version of the plot on the left (part (a)) by setting the y-axis in log-scale. It is seen that each of the materials show a single peak in their Z spectrum at a certain frequency. This peak is located at 1.501×10^{14} rad/s for SiC, 1.063×10^{14} rad/s for GaN, and 1.991×10^{14} rad/s for cBN. These peak locations correspond to locations very near to these materials' transverse optical phonon frequencies, i.e., ω_{TO} . As discussed by (Ordonez-Miranda *et al.* 2017) for SiC, at around ω_{TO} of the materials, surface phonon polaritons carry more energy. In addition, the dips in their Z spectrum (in Figure 2(b)) are located very near to the materials' ω_{LO} , such that the minima of Z appeared at 1.829×10^{14} rad/s for SiC, 1.387×10^{14} rad/s for GaN, and 2.417×10^{14} rad/s for cBN.

When the overall polaritonic figure of merit peak magnitudes are compared, it is seen that SiC has the highest, followed by cBN and then GaN. In comparison, the peak magnitude of Z value of SiC is more than 4 times greater than that of cBN, and more than 17 times greater than that of GaN.

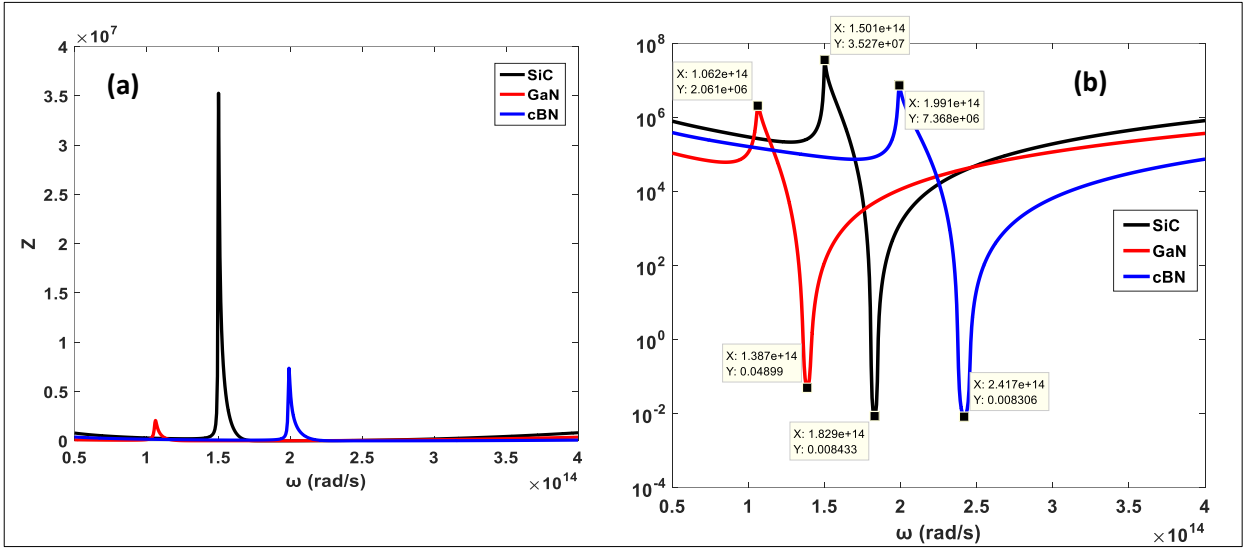


Figure 2. (a) The overall polaritonic figure of merit (Z) of SiC, hBN, GaN, and cBN along the material-vacuum interface, (b) the plot in part (a) with y-axis in log-scale.

One of the components of the overall polaritonic figure of merit (Z) is the Z_e , which relates to the capacity of the structure to enhance the polariton thermal conductivity (Ordenez-Miranda *et al.* 2017). Z_e is hence considered as the energy aspect of the overall polaritonic figure of merit. Figure 3 (a) shows the Z_e trends for SiC, GaN, and cBN. The Z_e values exhibit a minimum at 1.828×10^{14} rad/s at SiC, 1.387×10^{14} rad/s for GaN, and 2.412×10^{14} rad/s for cBN. These angular frequency values point out to another material-specific quantity, resonant frequency (ω_{res}), defined as in Eq. (7) for a single polar crystal-vacuum interface (Francoeur 2010):

$$\omega_{res} \approx \sqrt{\frac{\epsilon_{\infty} \omega_{LO}^2 + \omega_{TO}^2}{\epsilon_{\infty} + 1}} \quad (7)$$

With the light of the permittivity data given in Table 1 with Eq. (7), the ω_{res} values for SiC, GaN, and cBN are calculated respectively as 1.8049×10^{14} rad/s, 1.3605×10^{14} rad/s, and 2.3765×10^{14} rad/s.

The results presented in Figure 3 (a) can be interpreted along with the polariton propagation lengths, which relate to the ability of the polaritons to travel long distances (Ordenez-Miranda *et al.* 2017).

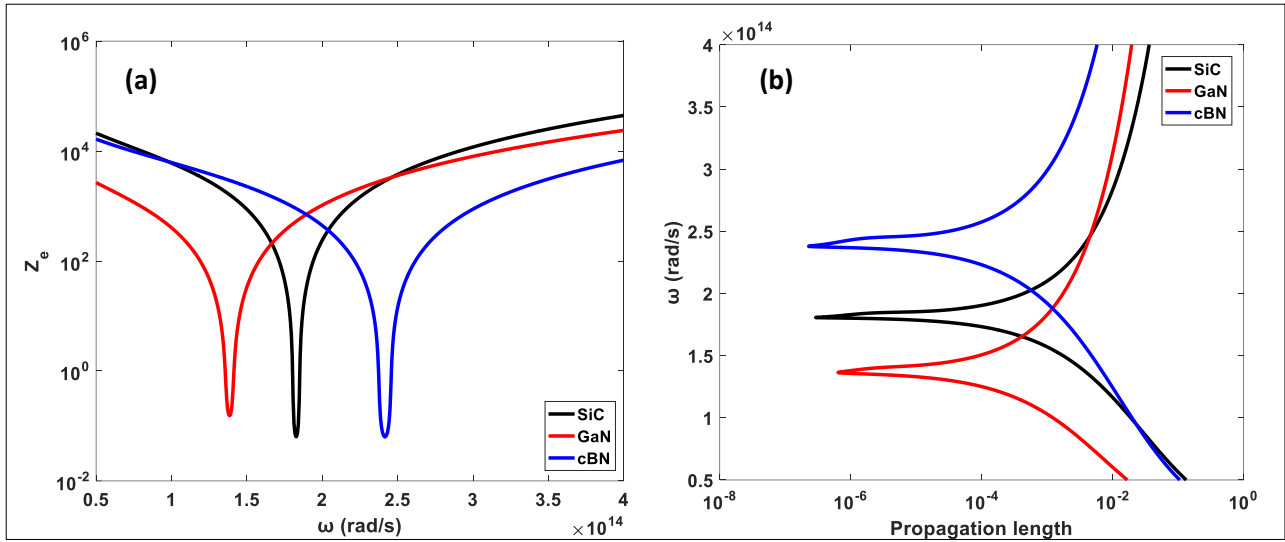


Figure 3. (a) The Z_e component of overall polaritonic figure of merit for SiC, GaN, and cBN along the material-vacuum interface, (b) the phonon propagation lengths at the SiC-, GaN-, and cBN-vacuum interface.

As shown in Figure 3 (b) the polariton propagation lengths are at their minimum around the ω_{res} calculated for SiC, GaN, and cBN for single material-vacuum interface. This points out to the fact that when polaritons propagation length is small, they are highly confined at around these frequencies. Strong confinement of surface polaritons comes with high momentum (Dubrovkin *et al.* 2020), and they reflect their evanescent decay (as in Figure 1) and highly localized nature.

The other component of the overall polaritonic figure of merit is Z_p , which relates to the ability of the structure (here, the SiC-, GaN-, and cBN-vacuum interface) to support polaritons' longitudinal propagation and transverse confinement. Figure 4 (a) depicts the Z_p trends for the studied material-vacuum interfaces. When Figure 4(b), which is the detailed version of Figure 4(a) is examined, it is seen that the peaks of Z_p are located very near the ω_{TO} of these materials, similar to the findings for overall polaritonic figure of merit, Z (in Figure 2), as also reported previously by (Ordonez-Miranda *et al.* 2017) for SiC. While this is the behavior with the Z_p maxima, the dips of Z_p are located at 1.829×10^{14} rad/s, 1.391×10^{14} rad/s and 2.415×10^{14} rad/s for SiC, GaN, and cBN, all of which are near the materials' ω_{res} values.

These results can be better interpreted considering the penetration depth results in Figure 4 (b), which

shows two dips in the penetration depth results in the studied spectral range, for SiC, GaN, and cBN. Examination of Figure 4 (b) reveals that the first and second dips as marked respectively with horizontal dashed and continuous lines are located at around ω_{res} and ω_{TO} values of the studied materials.

In magnitude, both the overall polaritonic figure of merit and the Z_p values are the highest for SiC-vacuum interface, followed by cBN-vacuum interface, and GaN-vacuum interface, respectively. The spectral nature of the polaritonic behavior for these settings reveal the importance of the material selection by the peaks and dips in the polaritonic figure of merits' spectral dependence on ω_{res} , ω_{TO} , and ω_{LO} values of the polar materials studied.

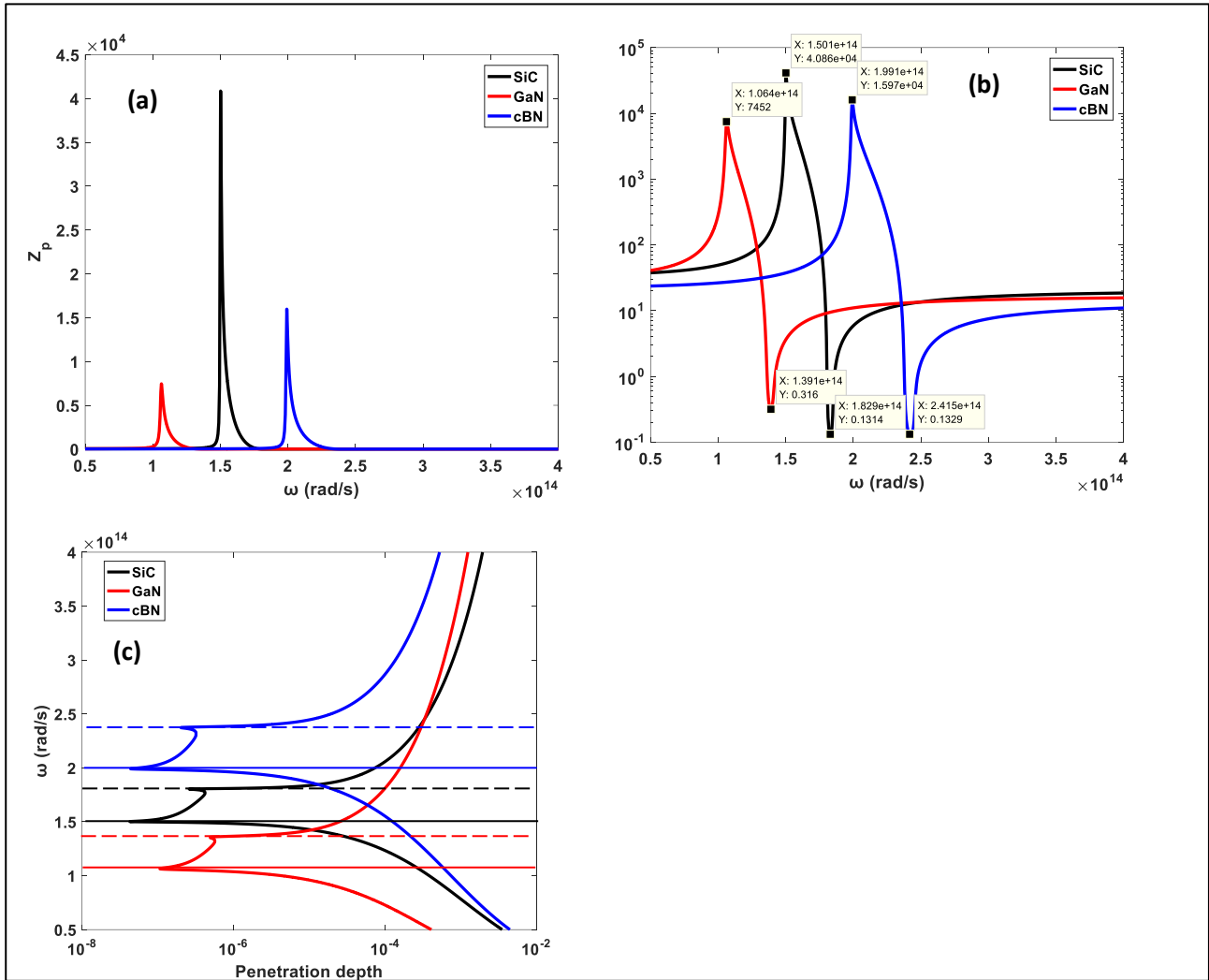


Figure 4. (a) The Z_p component of overall polaritonic figure of merit for SiC, GaN, and cBN along the material-vacuum interface, (b) the plot in part (a) with y-axis in log-scale, (c) the phonon penetration depths at the SiC-, GaN-, and cBN-vacuum interface.

4. Conclusions

In this work, the polaritonic figures of merit derived by (Ordóñez-Miranda *et al.* 2017) are solved for single material (SiC, cBN, or GaN)-vacuum interface systems. Solutions for SiC at two different temperatures (i.e., 295 K and 686 K) were previously presented by (Ordóñez-Miranda *et al.* 2017). In this current work, the permittivity data of SiC given for 295 K by (Ordóñez-Miranda *et al.* 2017) was utilized in recalculating single interface (SiC-vacuum) results for the figures of merit. The calculations are carried out for cBN and GaN this time for Z_e , Z_p , Z , propagation length, and penetration depth. The findings for SiC are then compared to the results for cBN and GaN.

SiC, GaN and BN (both hexagonal and cubic BN) have been commonly investigated in NFRT systems, due to their support of surface phonon polaritons in the IR, leading to very high LDOS and spectral radiative fluxes by orders of magnitude greater than the blackbody limit at a given emitter temperature, at around the materials resonance frequency. This fact can help development of energy-efficient systems that are needed today and in the future. To the best of the authors knowledge, this work is the first to present polaritonic behavior of GaN and cBN, and compare them to those of SiC. Results showed that both Z_p and Z exhibited the highest peak magnitude for SiC, followed by cBN and then GaN, at around the resonance frequencies of these materials. The overall polaritonic figure of merit of SiC is greater

than that of cBN by more than 4 times. The peak magnitudes of the overall figure of merit (Z) for SiC, cBN, and GaN are calculated respectively as 3.527×10^7 , 7.368×10^6 , and 2.061×10^6 , centered around very near these materials' ω_{TO} . The dips in the Z spectrum are also material-specific, as they are located very near to the materials' ω_{LO} . When it comes to Z_p component of the overall polaritonic figure of merit, Z , it is seen that the peak magnitude for SiC, cBN, and GaN are 4.086×10^4 , 1.597×10^4 , and 7.452×10^3 , centered around very near these materials' ω_{TO} . The dips in the Z_p spectrum are also material-specific, as they are located very near to the materials' ω_{res} .

This single interface (dielectric material-vacuum) system setting is fundamentally important as it involves one material and vacuum, fully reflecting the impact of the materials nature on the polaritonic performance. This is because polaritonic behavior of textured/corrugated surfaces and multi-layers (Didari *et al.* 2018a) implicitly include the effects of presence of such thin layers and nano-elements on the surfaces, their thicknesses, shapes, etc., in addition to the sole effect of the material. It is therefore important to understand the sole

influence of the materials themselves in this fundamental configuration to develop new and more efficient systems. The results indicate that these merits are strongly influenced by the material type (and hence the materials dielectric properties) such that the performance merits' maximum and minimum points are located very near the ω_{res} , ω_{TO} and ω_{LO} values of the materials. Considering the fact that these semiconductors can be doped/mechanically modified to fine-tune their properties, and the technological nano-patterning opportunities, the material(s) can be selected with the desired polaritonic behavior, including optimum polariton propagation and confinement, for their potential use in opto-electronics, sensing, characterizing, and harvesting nano-devices. Such polaritonic performance evaluations of materials (both plasmonic and phononic) are expected to provide solid insight on development of systems including those harvest energy (e.g., NFRT), utilize surface polariton (plasmon, phonon, hybrid) resonance.

5. References

- Basu, S. 2016. Near-Field Radiative Heat Transfer across Nanometer Vacuum Gaps: Fundamentals and Applications, Elsevier, 119-264.
- Berini, P., 2006. Figures of Merit for Surface Plasmon Waveguides, *Optics Express*, **14**, 26, 13030–42.
- Buckley, R., P. Berini., 2007. Figures of Merit for 2D Surface Plasmon Waveguides and Application to Metal Stripes, *Optics Express*, **15**, 19, 12174–82.
- Caldwell, J. D. et al., 2015. Low-Loss, Infrared and Terahertz Nanophotonics Using Surface Phonon Polaritons, *Nanophotonics*, **4**, 44-68.
- Chen, Y., and Xuan, Y., 2015. The Influence of Surface Roughness on Nanoscale Radiative Heat Flux between Two Objects, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **158**, 52–60.
- Didari, A., Elçioğlu, E.B., Okutucu Özyurt, T. and Mengüç, M.P., 2018a. Near-Field Radiative Transfer in Spectrally Tunable Double-Layer Phonon-Polaritonic Metamaterials, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **212**, 120-127.
- Didari, A., Elçioğlu, E.B., Okutucu-Özyurt, T., and Mengüç, M.P., 2018b. Tailoring Near-Field Thermal Radiation with Mesoporous GaN and h-BN Designer Metamaterials, in *Eurotherm Seminar 110 – Computational Thermal Radiation in Participating Media - VI*, Cascais, Portugal.
- Didari, A., and Mengüç, M. P., 2015. Near-Field Thermal Emission between Corrugated Surfaces Separated by Nano-Gaps, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **158**, 43–51.
- Didari, A. and Mengüç, M.P., 2017. A Design Tool for Direct and Non-Stochastic Calculations of near-Field Radiative Transfer in Complex Structures: The NF-RT-FDTD Algorithm. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **197**, 95–105.
- Dönmezer, F. N. 2009. A Numerical Study on Dependent Absorption and Scattering by Interacting Nanosized Particles, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and

Applied Sciences, 99.

Related Materials, 7, 360–364.

- Dönmezer, F. N., Mengüç, M.P., and Okutucu, T., 2010. Dependent Absorption and Scattering by Interacting Nanoparticles. in *6th International Symposium on Radiative Transfer (RAD10)*, Antalya, Turkey.
- Dubrovkin, A.M. et al., 2020. Resonant Nanostructures for Highly Confined and Ultra-Sensitive Surface Phonon-Polaritons, *Nature Communications*, **11**, 1863, 1–7.
- Elçioğlu, E. B. 2018. Fabrication of Silicon Carbide-on-Silicon Based Devices for Effective Near-Field Thermal Radiation Transfer, PhD Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 183.
- Elçioğlu, E. B., Didari, A., Okutucu-Özyurt, T., and Mengüç, M.P., 2017. GaN-SiC Katmanlı Nano-Yapılar ve Yakın-Alan Işınımına Sıcaklık Farkı ve Mesafenin Etkileri, in *21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi ULIBTK'17 Bildiriler Kitabı*, Çorum, Turkey.
- Feynmann, R., 1960. There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, **23**(5): 22–36.
- Francoeur, M., and Mengüç, M.P., 2008. Role of Fluctuational Electrodynamics in Near-Field Radiative Heat Transfer. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **109**(2), 280–93.
- Francoeur, M. 2010. Near-Field Radiative Transfer: Thermal Radiation, Thermophotovoltaic Power Generation and Optical Characterization, PhD Thesis, University of Kentucky, The Graduate School, 323.
- Francoeur, M., 2015. Nanostructures Feel the Heat, *Nature Nanotechnology*, **10**, 206-208.
- Howell, J.R., Mengüç, M.P., Daun, K., and Siegel, R., 2021. Thermal Radiation Heat Transfer. 7th Edition, Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 741-774.
- Huber, A. J., Deutsch, B., Novotny, L. and Hillenbrand, R., 2008. Focusing of Surface Phonon Polaritons, *Applied Physics Letters* **92**, 203104.
- Huseynov, E.M., 2020. Thermal Stability and Heat Flux Investigation of Neutron-Irradiated Nanocrystalline Silicon Carbide (3C – SiC) Using DSC Spectroscopy, *Ceramics International*, **46**, 5645–48.
- Lebedev, A. A, and Chelnokov, V.E., 1999. Wide-gap semiconductors for high-power electronics, *Semiconductors*, **33**(9), 999-1001.
- Litvinov, D., Taylor II, C. A., Clarke, R., 1998. Semiconducting cubic boron nitride, *Diamond and*
- Maier, S.A., 2006. Effective Mode Volume of Nanoscale Plasmon Cavities, *Optical and Quantum Electronics* **38**, 257–67.
- Mishra, U.K.M., Shen, L., Kazior, T.E. and Wu, Y.-F., 2008. GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers, *Proceedings of the IEEE*, **96**(2): 287–305.
- Narayanaswamy, A. and Chen, G., 2003. Surface Modes for near Field Thermophotovoltaics, *Applied Physics Letters*, **82**(20), 3544-3546.
- Ordonez-Miranda, J., et al. 2017. Polaritonic Figure of Merit of Plane Structures., *Optics Express* **25**(21): 25938–25950.
- Park, K. and Zhang, Z., 2013. Fundamentals and Applications of Near-Field Radiative Energy Transfer, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, **4**, 013001.
- Pearnton, S.J., et al., 2002, New applications advisable for gallium nitride, *Materials Today*, **5**(6), 24-31.
- Sharma, V., et al., 2020. Thermal Transport Properties of Boron Nitride Based Materials: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **120**, 109622.
- Talwar, D. N., 2004. Lattice Dynamics of Defects and Thermal Properties of 3C-SiC, in *SiC Power Materials* (Ed: Feng, Z. C.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 161-208.
- Wondrak, W., et al., 2001. SiC Devices for Advanced Power and High-Temperature Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **48**(2), 307-308.
- Zhao, Y., Tang, G.H., and Li, Z.Y., 2012. Parametric Investigation for Suppressing Near-Field Thermal Radiation Between Two Spherical Nanoparticles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **39**, 918–922.

Erozif Aşınma Testlerinde Farklı Nozul Tasarımlarının PMMA Üzerinde Aşınma İzi Alanı ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi

Barış ÖNEN^{*1}, Ekrem ALTUNCU², Ali ÇINAR³

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kocaeli

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Malzeme ve Üretim Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Sakarya

³ Kocaeli Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

Sorumlu Yazar e-posta: baris.onen@kocaeli.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8579-7124>

e-posta: altuncu@subu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-9013>

e-posta: alicinar@kocaeli.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3467-150X>

Geliş Tarihi: 08.12.2020

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Katı partikül erozyonu, basınçlı bir hava akımı aracılığıyla taşınan aşındırıcı sert partiküllerin yüksek hızlarda katı malzeme yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarparak malzeme yüzeyinde önemli oranda kütle kaybına sebep olan bir aşınma hasar türüdür. Özellikle havacılık endüstrisinde kullanılan birçok mühendislik malzemesi uçağın iniş kalkış ve seyri esnasında bulunduğu hava ortamında uçan katı partiküller nedeniyle katı partikül erozif aşınmasına maruz kalmaktadır. Polimetilmetakralat (PMMA) esaslı malzemeler yüksek yüzey dirençleri, UV dirençleri ve dış ortam koşullarına dayanıklılıkları ve saydam özellikleri nedeniyle genel olarak uçak pencerelerinde yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada PMMA malzeme yüzeyinde katı partikül erozyonu nedeni ile oluşan aşınma izi alanına ve yüzey pürüzlülüğüne erozif aşınma testlerinde farklı nozul tasarımlarının etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında farklı geometrilerde nozullar tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu nozullar ile erozif aşınma testleri plaka numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve nozul tasarımına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma izinin alanı görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilmiştir. Görüntü işleme ile aşınma izleri görsel olarak sunulmuş ve aşınma iz alanları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Aşındırılan numuneler üzerinde ortalama alansal pürüzlülük değerleri optik profilometre yardımı ile belirlenmiştir. Genel olarak çalışmanın sonucunda farklı nozul geometrilerinin yüzey pürüzlülük değerlerini ve aşınma iz formunu önemli oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Laval tipi ve boğazlı nozullar içerisinde en dar kesitlere sahip olan nozullarda en yüksek oranda ortalama alansal pürüzlülük ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler

Katı partikül erozyonu;
Nozul geometrisi;
Aşınma alanı; Görüntü işleme; Yüzey pürüzlülüğü

Investigation of the Effects of Different Nozzle Geometries at Erosive Wear Tests on the Wear Track Area and Surface Roughness of PMMA

Abstract

Solid particle erosion is a severe wear failure type and it can cause the loss of mass and damage on material surfaces through abrasive hard particles carried by the air flow, which at high speed repetitively impact the surfaces. Especially many engineering materials used in aviation industry are subjected to heavy damage by solid particle erosion during flight, landing on and landing off. Polymethylmetacralate (PMMA) based materials are generally used extensively in aircraft windows due to their high surface resistance, UV resistance, outdoor availability and transparent properties. In this study, it is aimed to investigate the effects of different nozzle geometries on the area of wear and surface roughness caused by solid particle impingement on the PMMA surface. In the experimental studies, first phase of this study, different geometric sized nozzles were designed and manufactured. Erosive wear tests were carried out with the manufactured nozzles on flat samples. The area of the erosion tracks on the surface was analyzed by image processing methods for each nozzle geometry. Wear tracks are analyzed by image analysis methods and the wear track areas are calculated and compared. The average area roughness values of the eroded samples were determined with the help

Keywords

Solid particle erosion;
Nozzle geometry;
Wear area; Image processing; Surface roughness

of an optical profilometer. In general, it has been observed that different nozzle geometries significantly affect surface roughness and track areas. The average area roughness was highest in the laval type with narrow throat nozzles.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Erozif aşınma testlerinde ve malzemelerin erozif aşınma performansının belirlenmesinde çok sayıda parametre söz konusu olup bunlar arasında en önemli parametrelerden bir tanesi de geometrik nozul tasarımıdır (Lupoi and O'Neill 2011, Settles and Gary 1996, Kline et al. 1988, Seavey 1985). Nozul, katı partikülün kütleli debi ve hızına bağlı olarak hareketini şekillendiren en önemli fiziksel unsurdur. Nozul geometrisi hava/partikül karışımının hareketini belirlemektedir. Akışkanlar mekaniğinde havanın hareketini yönlendiren kesit değişimleri, uzunluklar, yüzey özellikleri, malzeme/akışkan arası sürtünme katsayısı gibi veriler partikül erozyonunu etkileyen nozula ait alt parametrelerdir. Burada en önemli kısım nozul içinde havanın ve partiküllerin hareketlerinin nozul geometrisine göre değişimleridir. Nozulun sabit çapta tam silindirik olması, giriş ve çıkış çapları arasında farklılıkların olması ya da nozul içinde bir boğaz olması, o boğaz kısmına kadar bir daralmanın olması, boğaz sonrası genişlemenin olması, boğazın konumu, bu daralma ve genişlemelerin açıları vb. her biri bir tasarımsal bir parametredir. Bu parametreler öncelikle nozul içindeki havanın (gaz akışkan) hızını ve basıncını etkilemektedir. Bu durum doğrudan hareket eden katı partiküllerin hızlarına etki etmektedir. Kütleli debi arttıkça nozul içindeki boğazdan geçen hava/partikül karışımının geçebileceği alan giderek daralmaktadır. Olabildiğince laminar bir akış sağlanmış olsa bile yerçekimi etkisi ve aerodinamik etkiler nedeniyle partiküllerin birbirine ve nozul çeperlerine çarpma eğilimleri artmaktadır. Bu partiküllerin hem laminar akışta olduğu gibi doğrusal hızlanmalarına negatif etki etmekle beraber hem de çarpma sonrası hız ve enerji kaybetmelerine, hareket doğrultularını değiştirmelerine neden olabilmektedir. Dolayısı ile bu boğazın çapının büyüklüğü, nozul içindeki konumu oldukça önemlidir. Boğaz bulunan nozul tiplerinde giriş ile boğazın bulunduğu yere kadar olan noktaya kadar kesit göreceli olarak giderek

azalmaktadır. Bu açı son derece önemlidir. Aynı şekilde buradaki mesafe de çok önemli parametrelerden bir tanesidir (Sutton and Biblarz 2013, Momber 2008).

Katı partiküller ile kumlama; otomotiv, gemi yapım, boyama ve yüzey hazırlama endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan yüzey işlem yöntemlerinden bir tanesidir (Lupoi and O'Neill 2011, Settles and Gary 1996, Kline et al. 1988, Seavey 1985, Sutton and Biblarz 2013). Kumlama ile malzemelerin yüzeylerinin işlenmesinde temel amaçlardan biri malzeme yüzeyinin istenilen pürüzlülük değerlerine getirilmesidir. Özellikle boyama, yapıştırma ve kaplama uygulamaları öncesi, otomotiv ve havacılık uygulamalarında malzemelerin yüzeyleri kumlama ile pürüzlendirilmektedir. Değişen nozul geometrisi ile hedef malzemenin kumlama operasyonunda katı partikül erozyonu ile yüzey pürüzlülüğünde önemli miktarda değişeceği aşikardır (Turchi et al. 2014, Strojny et al. 2000, Winter and Hutchings 1974). Havacılıkta PMMA esaslı malzemeler yoğun olarak pencere sistemlerinde kullanılmaktadır. Uçağın hareketi esnasında ortamdaki katı partiküller ile temas eden bu yüzeylerde erozif aşınma ve darbe riski söz konusudur (Şekil 1). Bu nedenle bu çalışmada termoplastik bir malzeme olan PMMA numunelerin yüzeyinde katı partikül erozyonu nedeni ile oluşan aşınma iz alanına ve yüzey pürüzlülüğüne farklı nozul tasarımlarının etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Nozul tasarımlarının ilk aşamasında bilgisayar destekli analiz yöntemleri kullanılarak aşındırma işlemi modellenmiş ve uygun nozul tasarımları belirlenmiştir. İkinci aşamada bu bilgiler ışığında belirlenen nozullar kendi imkanlarıyla sanayide 6 eksenli cnc tezgahı kullanan bir işletmede imal edilmiştir. Nozullar iç geometrilerinin üretim zorluğundan dolayı metal oksit kullanılarak değil, çelik malzemedan imal edilmişlerdir. Fakat kısa sürede aşınmalarını engellemek için üretimleri sonrası ısıtma tabi tutularak yüzeyinin sertleşmesi sağlanmıştır. Nozullar imal edildikten sonra katı partikül erozif

aşınma test ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile nozul tasarımına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma izinin alanı görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilmiş ve yüzey pürüzlülük etkileri ortaya çıkarılmıştır.

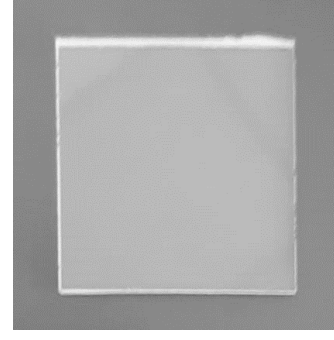


Şekil 1. Katı partikül erozif aşınma gözlemlenen PMMA yüzeyler

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Malzemeleri

Katı partikül aşınma testinde test malzemesi olarak termoplastik bir polimer olan polimetil metakrilat (PMMA) plakalar kullanılmıştır. PMMA, şeffaf ve saydam özellikleri ve düşük nem absorpsiyonuna ve düşük yoğunluğa sahiptir. PMMA, mekanik özellikler bakımından yüksek dayanım, boyutsal kararlılık, yüksek elastik modülü, iyi sertlik değerleri ve düşük kopma uzamasına sahiptir. PMMA, seyreltilmiş asitler, halka-silikat bileşenleri, alifatik hidrokarbonlar gibi, zorlu şartlara dayanma gücüne sahiptir. PMMA mükemmel optik özelliklere sahip olup, görünür bölgedeki ışık geçirgenliği oldukça yüksektir. PMMA, mükemmel optik berraklık ile güvenlik camları, ışık armatörleri, tavan pencereleri, lensler, fiber optikler, takma dişlerde, dolgularda ve kontak lenslerde kullanım alanı bulmaktadır (Bel vd. 2019, Foster and Wool 1991). Deneysel çalışmalarda yüzeyi alkol ile temizlenmiş plaka numuneler 50x50x5 mm boyutlarındadır (Şekil 2). Bunun yanında erozif aşınma testlerinde aşındırıcı partikül olarak 120 mesh boyutundaki yüksek saflıkta alüminyum oksit kullanılmıştır.



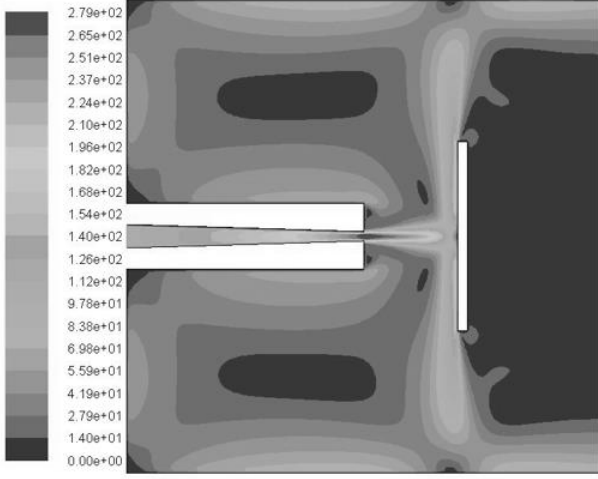
Şekil 2. Test numunesi (PMMA)

2.2. Testlerde Kullanılan Nozul Geometrileri

Birçok endüstri dalında bir ürünün performansının daha ürün tasarım sürecindeyken bilinmesi oldukça önemlidir. Böylece ürünün artan performans isteklerini karşılayıp karşılamadığı daha tasarım aşamasında görülebilir, probleme sebep olan etkenler bu aşamada ortadan kaldırılabilir ve optimize edilmiş ürün piyasaya sürülerek ürünün rekabet gücünü ve müşteri memnuniyetini artırma imkanına sahip olunabilir (Önen 2016).

Nozul geometrileri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma öncesi hız kazanmalarında ve hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yayılım alanlarının üzerinde birinci dereceden etkiye sahiptir. Bu yüzden farklı iç geometrilere sahip nozullar tasarlanarak üretilmiş, katı partikül erozyonu testlerinde bu farklı nozul geometrileriyle deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılarak kullanım amacına yönelik olarak hangi geometrinin optimum sonuçları vereceği ortaya konulmaya çalışılmıştır (Önen vd. 2015).

Bu analizde, bir sayısal modelleme katı parçacık erozyon işlemi ile ilgili nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafe, ivmelenme basıncı ve parçacık boyutu etkilerinin belirlenmesi amacıyla ve iki fazlı akış olan gaz-katı akışını eksiksiz olarak simüle etmek için Ansys-Fluent 14.5 programı kullanılmıştır. İki boyutlu düzlemde simetrik modeller hesaplama süresini azaltmak için kullanılmaktadır. Basıncı hava ideal ve sıkıştırılabilir olarak alınmıştır. Kararlı bir durumda; akış alanını ve sonuçları çözmek için Fluent'te kullanılan mevcut bir birleştirilmiş kapalı yöntem elde edilmiştir. Realizable K-ε türbülans modeli simülasyonda kullanılmıştır ve partikül hızlanması ayrık faz modelleme kullanılarak hesaplanır. Bu modellemenin bir örneği Şekil 3'de gösterilmiştir (Önen 2016).



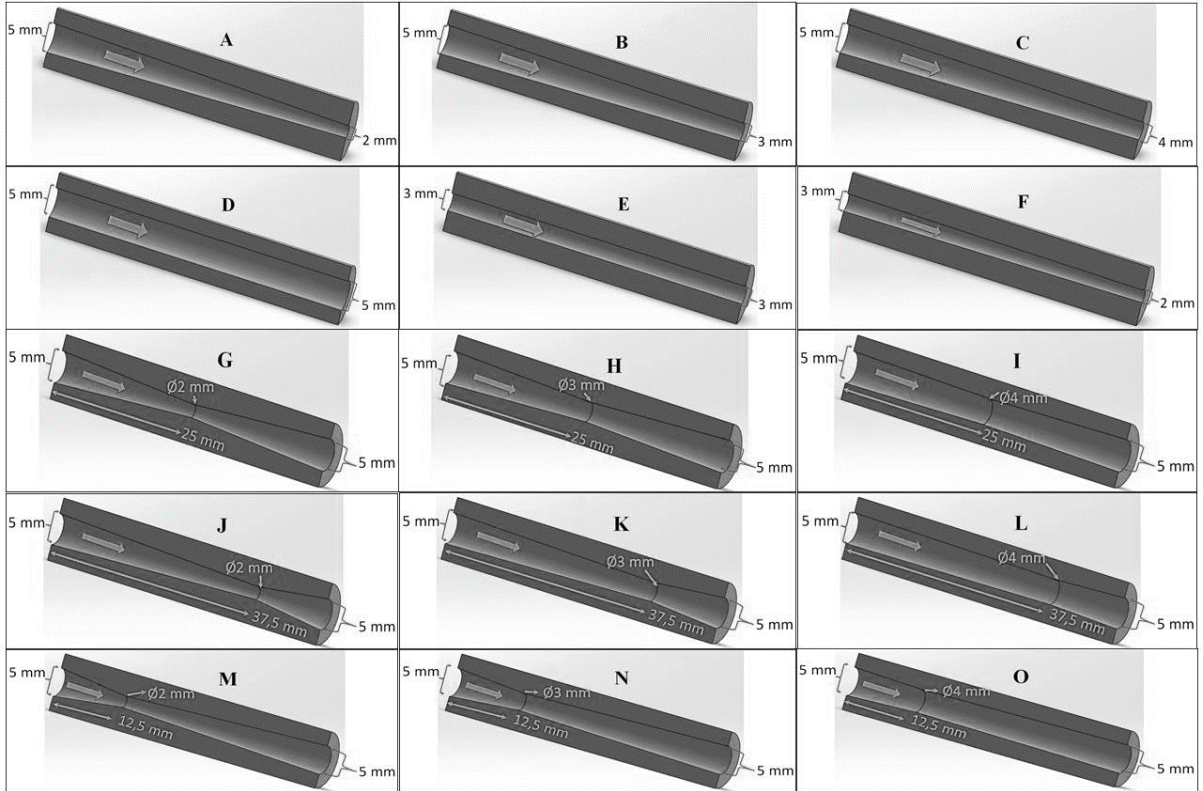
Şekil 3. İki boyutlu modellemesi yapılan nozul geometrisinde akış analizi

Yapılan bu analizler sonucunda, farklı geometrik ölçülerde tasarlanan ve üretilen 15 adet nozulun

ölçüleri, nozul adları ve grupları Çizelge 1'de ve Şekil 4'de sergilenmektedir.

Çizelge 1. Farklı nozul geometrilerinin ölçüleri

Nozul Adı	Nozul Giriş Çapı (mm)	Boğaz Çapı (mm)	Boğaz Yeri (mm) (Girişe olan mesafe)	Nozul Çıkış Çapı (mm)	Nozul Grupları
A	5	-	-	2	I. Grup
B	5	-	-	3	I. Grup
C	5	-	-	4	I. Grup
D	5	-	-	5	I. Grup
E	3	-	-	3	II. Grup
F	3	-	-	2	II. Grup
G	5	2	25	5	III. Grup
H	5	3	25	5	III. Grup
I	5	4	25	5	III. Grup
J	5	2	37,5	5	IV. Grup
K	5	3	37,5	5	IV. Grup
L	5	4	37,5	5	IV. Grup
M	5	2	12,5	5	V. Grup
N	5	3	12,5	5	V. Grup
O	5	4	12,5	5	V. Grup



Şekil 4. Eroziyon testlerinde kullanılan nozul geometrileri

2.3. Katı Partikül Eroziyon Testleri

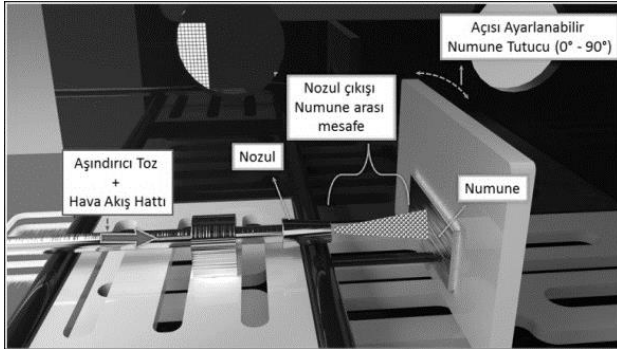
Katı partikül erozyon testleri eroziyon aşınmayı ölçmek için amaçlanmış basınçlı kuşlama test sisteminde gerçekleştirilmiştir. Test ünitesinin bileşenleri (Şekil 5): ana taşıyıcı gövde, püskürtme haznesi, vakumlu

katı partikül haznesi, açılı ayarlanabilir plaka tutucu, basınç kontrollü bir hava kompresörü ve püskürtme tabancası ve nozulu ile bağlantı hortumlarından oluşmaktadır (Önen vd. 2017). Bu deneysel çalışmada katı partikül eroziyon testleri ASTM

G76-95 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test parametreleri Çizelge 2’de sergilenmektedir. Genel olarak aşınma testlerinde katı partiküller plaka numunelere 90° çarpma açısında, 1.5 bar püskürtme basıncında 20 sn. süreli püskürtülmüştür. Test plakaları nozul çıkışından sabit 50 mm mesafe uzaklığa yerleştirilmiştir. Her test 3 kez tekrar yapılarak ortalaması alınmıştır. Testlerde plakalar üzerinden aşınma kayıpları hassas bir terazide ($\pm 0,1$ mg) aşınma öncesi ve sonrasında tartılarak kütle kayıpları ölçülmekte ve aşınma hızları hesaplanmaktadır.

Çizelge 2. Kumlama testi parametreleri

Katı Partikül Türü	Alüminyum oksit, Al ₂ O ₃
Boyutu	120 mesh
Çarpma Açısı	90°
Püskürtme Basıncı	1.5 bar
Test Sıcaklığı	25 °C \pm 2 °C
Test Süresi	20 saniye
Nozul -Numune arası mesafe	50 mm

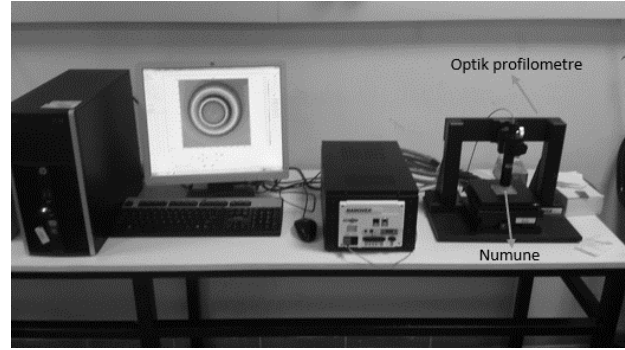


Şekil 5. Kumlama kabini test düzeneği

2.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Aşınma testleri sonrasında plaka yüzeyleri incelenerek yüzey aşınma izleri ve aşınma geometrileri ölçülmektedir. Bununla birlikte yüzeyin pürüzlülük değişimi incelenmektedir. Farklı geometrik ölçülerde nozullar ile yapılan testlerde numunelerin yüzeylerinden Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı ile yüzey profili incelenmiş ve pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Şekil 6’da deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazının test düzeneği sergilenmektedir. Bu test düzeneğiyle numune

yüzeyi taranarak üç boyutlu yüzey topografileri analiz edilmiştir.



Şekil 6. Optik profilometre cihazı ve test düzeneği

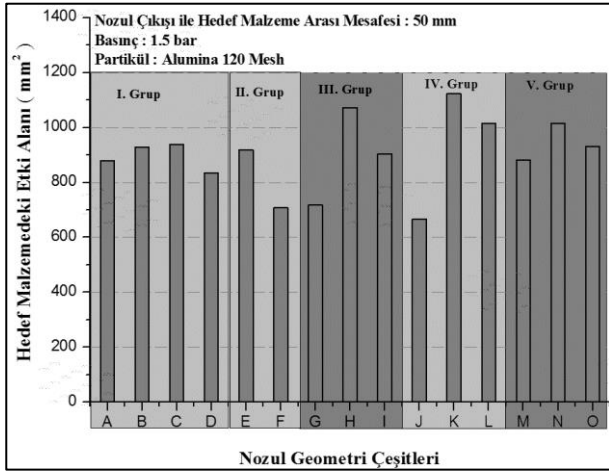
2.5. Görüntü İşleme

Numunelerin farklı nozullarla aşınmış yüzeylerinin görüntülerinin elde edilmesi sonrasında görüntü işleme aşamasına geçilmiştir. Farklı nozul geometrileri kullanılarak gerçekleştirilen katı partikül erozyonunun, PMMA yüzeylerinde oluşturduğu hasarın yüzey dağılım alanlarına etkilerini ortaya koymak amacıyla yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri tarayıcıdan elde edilmiştir. Tarama sonrası elde edilen 2 boyutlu numune yüzey resimleri Image J açık kodlu görüntü işleme programı algoritmaları yardımıyla işlenmiştir. Her bir nozul geometrisi için PMMA numunelerde yüzeyde aşınma dağılım alanları hesaplanarak görüntüler elde edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

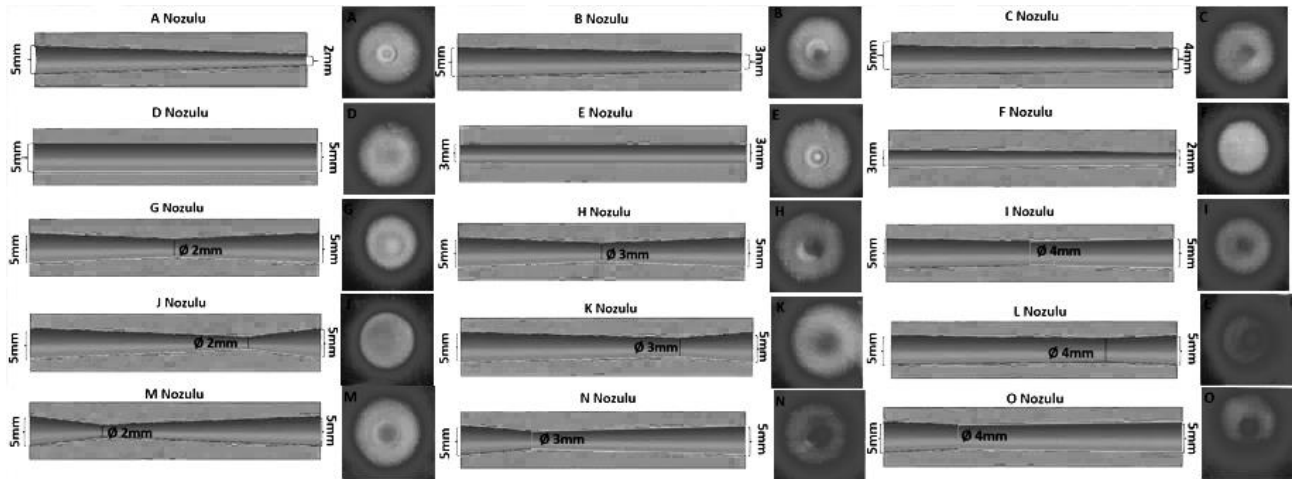
Şekil 7’de farklı nozul geometrilerine bağlı olarak 120 mesh alümina aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde aşınma sonucu oluşan aşınma bölgesi etki alanları verilmiştir. I. ve II. grup nozulları incelediğimizde nozulun çıkış çapı arttıkça etki alanının arttığı görülmüştür. Bu nozul tiplerinde çap arttıkça aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstererek hedef malzeme yüzeyinde daha büyük bir etki alanı yaratmışlardır. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V. grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 120 mesh alüminanın hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının 2 mm’den 3 mm’ye çıkması ile etki alanında artış meydana gelirken, 3 mm’den 4 mm’ye geçişte

etki alanında azalma gerçekleşmektedir. Bu durum üç grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına H ve K nozulları sahip olmuştur.



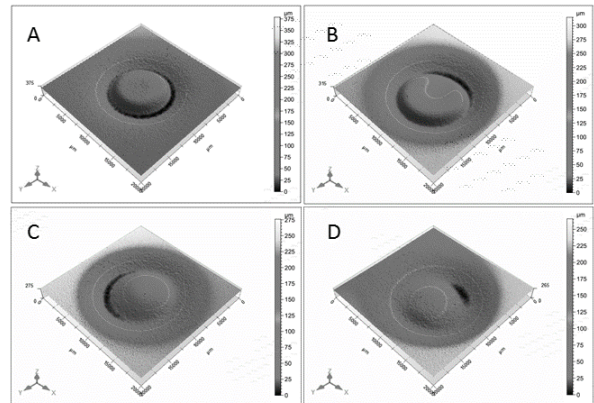
Şekil 7. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

Şekil 8’de 120 mesh alüminanın aşındırıcı kullanılarak farklı nozul geometrileriyle yapılan testler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde hedef malzeme yüzeyinde geniş bir alanda aşınma izinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. PMMA’nın erozif aşınma testleri sonrası A ve E nozullarında aşındırıcı partiküller merkez noktada daha fazla aşınmaya sebep olarak “puslanma” olarak adlandırılan bir hasar mekanizması ortaya çıkarmıştır. Şeffaf bir malzeme olan PMMA’da aşındırıcı partiküllerin tekrarlı çarpması sonucu opak bir bölgenin merkezde ortaya çıkarak görüntü kaybına sebep olması “puslanma” olarak adlandırılır. Puslanma bölgesi izi merkezde A ve E nozullarıyla yapılan aşındırma testleri sonrası daha net görülmüştür. L, N ve O nozullarında ise merkezde aşınmanın fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Bu tip nozullarda aşındırıcı partiküllerin merkezde odaklanmadığı görülmektedir.



Şekil 8. Farklı nozul geometrilerinin oluşturduğu erozif aşınma iz görüntüleri

Şekil 9’da farklı nozullar kullanılarak pürüzlendirilen hedef malzemelerin 3 boyutlu yüzey topografyaları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde nozul geometrisine bağlı olarak oluşan erozif aşınma izinin geometrisinin ve topografyasındaki değişim dikkat çekmektedir. Nozul çıkış çapının artışı ile erozif aşınma izinin kapladığı alanın arttığı A ve D nozullarının analiz sonuçları karşılaştırıldığında net bir şekilde görülmektedir.

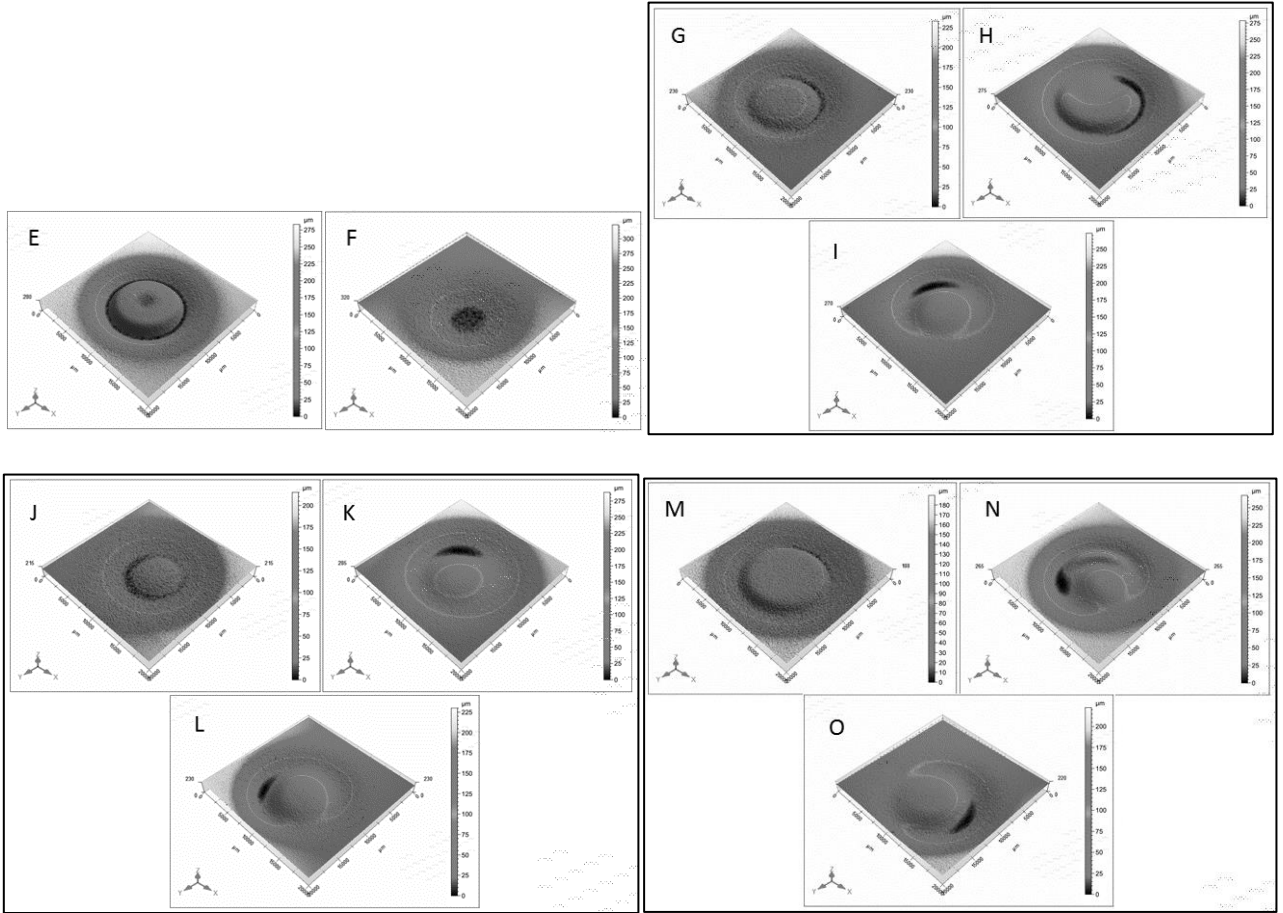


Şekil 9. I. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA’nın üç boyutlu yüzey topografyaları

Bu durumun yüzey pürüzlülük sonuçlarında belirtildiği gibi nozul çıkış çapının artışı ile aşındırıcı partiküllerin nozul çıkışı sonrası saçılarak daha büyük bir alana çarpmaları ve aşınma gerçekleştirmeleri ile açıklanabilir.

Boğaz içermeyen ve dar bir nozul giriş ve çıkış çapına sahip olan F nozulunun meydana getirdiği aşınma izi diğer tüm nozullara göre farklılık göstermektedir. Diğer nozullar ile gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrasında hedef malzeme yüzeyinde merkezde aşınmanın sınırlı olduğu ve bu sınırlı alanın etrafında halka şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum nozul geometrisi nedeniyle hedef malzemenin tam merkezinde bir durma noktası meydana geldiği ve bu nedenle bu bölgeye çok az sayıda partikülün çarpması ile açıklanabilir. F nozulunda ise nozul tasarımına bağlı

olarak bir durma noktasının oluşmadığı ve aşınmanın izin merkezinde maksimum miktarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine daha düzenli bir şekilde yönlenecek şekilde tekrarlı bir şekilde belirli bir alana çarpması ile gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum topografyanın yanında verilen derinlik cetveline bakılarak da doğrulanmaktadır. Yüzeyde oluşan erozif aşınma kraterinin derinliğinin 300 µm'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Buna karşın nozul tasarımına boğaz eklenmesi ile oluşan iz derinliği düşmüştür. M nozulu için maksimum iz derinliği yaklaşık olarak 190 µm olarak ölçülmüştür. Bu değişim nozul tasarımının yüzeyde meydana gelen erozif aşınma kraterinin büyüklüğünü, geometrisini ve derinliğini büyük ölçüde değiştirdiğini ortaya çıkarmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Farklı grup nozul tasarımları ile pürüzlendirilen PMMA numunelerin üç boyutlu yüzey topografyaları

4. Sonuç

Bu çalışmada PMMA numuneler yüzeyinde katı partikül erozyonu nedeni ile oluşan aşınma iz alanına ve yüzey pürüzlülüğüne farklı nozul tasarımlarının etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Farklı geometrilerde 15 farklı nozul tasarlanmış ve imal edilmiştir. İmal edilen nozullar ile erozif aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve nozul tasarımına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma izinin alanı görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen sonuçlar;

- Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça hedef malzeme üzerindeki etki alanının arttığı görülmektedir.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü üç farklı partikül boyutunda da M nozulunda daha fazla olduğu görülmüştür. Genelde O nozulunda ise daha az ortalama yüzey pürüzlülüğü görülmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerine baktığımızda M nozulu, O nozuluna göre 2 kat daha fazla pürüzlülük yaratmıştır.
- PMMA yüzeyindeki ortalama alansal pürüzlülük değişimlerine baktığımızda düz ve konik nozullardan oluşan I. grup nozullarda daha fazla olduğu görülmüştür. Nozul çıkış çapının daralmasıyla ortalama alansal pürüzlülük değerinin arttığı belirlenmiştir.
- Nozul içerisinde boğazlı yapılara sahip nozullarda, düz ve konik nozul geometrilerine göre yaklaşık 2 kat pürüzlülük değerinde azalma oluşmuştur. Ayrıca boğazın nozul içerisindeki konumuna göre de değişim meydana gelmiştir. Nozul içerisindeki nozul girişine yakın boğaza sahip olanda daha az ortalama alansal pürüzlülük değeri oluşmuştur.
- 3 boyutlu yüzey topografyalarında nozul çıkış çapı arttıkça erozif aşınma izinin kapladığı alanın arttığı görülmüştür.
- F nozulu hariç diğer nozul geometrilerinde gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrasında hedef malzeme yüzeyinde merkezde aşınmanın sınırlı olup, bu sınırlı alanın etrafında halka şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülürken, F nozulunda ise aşınma izinin merkezde maksimum miktarda gerçekleştiği görülmektedir.

Bu çalışmayla katı partikül erozif aşınma davranışında kullanılan farklı geometrik ölçülerde nozulların aşınma izi geometrisine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur (Önen 2016).

5. Kaynaklar

- Bel T., Arslan C., Baydoğan N., 2019. PMMA / mikroküre / montmorillonite nanokompozit ve PMMA / mikroküre/halloysite nanokompozitin atom transfer radikal polimerizasyon tekniği ile üretilmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **34 (20)**, 687-700.
- Foster K.L. and Wool R.P., 1991. Strength of Polystyrene Poly (Methyl Methacrylate) Interfaces. *Macromolecules*, **24(6)**, 1397-1403.
- Kline E., Mort G., and LaCompte J., 1988. Improved Productivity from New Blast Nozzle Geometry. *Journal of Protective Coatings & Linings*, **5(2)**, 8-12.
- Lupoi R., O'Neill W., 2011. Powder stream characteristics in cold spray nozzles". *Surface & Coatings Technology*, **206**, 1069–1076.
- Momber A., 2008. Blast Cleaning Technology, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 154-166.
- Önen, B., 2016. Farklı Nozul Geometrilerinin Polimetilmetakrilat (PMMA) Yüzeyinde Katı Partikül Erozyonunun İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 154.
- Önen B., Yildiran Y., Avcu E., Çınar A., 2015. Investigation of the effects of erosion test parameters on the particle impingement velocity by using cfd analysis. *Acta Physica Polonica A*, **127**, 1225-1229.
- Önen B., Fidan S., Sınmazçelik T., Çınar A., 2017. Nozul içi geometrilerinin partikül erozyonunda hedef malzeme aşınma ve pürüzlülüğüne etkileri. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **32(4)**, 1051-1061.
- Seavey M., 1985. Abrasive Blasting Above 100 psi. *Journal of Protective Coatings & Linings*, **2(7)**, 26-37.

Settles G. S. and Garg S., 1996. Scientific View of the Productivity of Abrasive Blasting Nozzles. *Journal of Thermal Spray Technology*, **5(1)**, 35-41.

Strojny, N. R. Moody, J. A. Emerson, W. R. Even Jr and Gerberich W. W., 2000. Interfacial Fracture of Thin Polymer Films on Aluminum. *MRS Online Proceedings Library Archive*. **629**, 5.13.1–5.13.6.

Sutton G. E., Biblarz O., 2013. Rocket Propulsion Elements. 7, John Wiley & Sons, New Delhi, India, 45-100.

Turchi A., Bianchi D., Thakre P., Nasuti F., Yang V., 2014. Radiation and Roughness Effects on Nozzle Thermochemical Erosion in Solid Rocket Motors. *Journal of Propulsion and Power*, **30(2)**, 314-324.

Winter R. E., Hutchings I. M., 1974. Solid particle erosion studies using single angular particles. *Wear*, **29**, 181–194.