



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XX

SAYI / NUMBER: 4

AĞUSTOS / AUGUST 2020

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Ahmet Necdet Sezer Kampüsü
Fen Bilimleri Enstitüsü
AFYONKARAHİSAR
Tel: 444 03 03 / 10702
Belgegeçer: 0 272 228 13 10
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 20
Sayı / Number 4

e – ISSN: 2149-3367

AĞUSTOS 2020

AUGUST 2020

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

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

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

Yüksel OĞUZ, 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: 0 272 218 1460 - 1465/1467
Belgegeçer: 0 272 228 13 10
e-posta: fmbd@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article Kuzeydoğu Anadolu'daki Trabzon Kertenkelesi, <i>Darevskia rudis</i> (Bedriaga, 1886) (Sauria: Lacertidae) Türünde Eşeyssel Dimorfizm Sexual Dimorphism In Spiny - tailed Lizard, <i>Darevskia rudis</i> (Bedriaga, 1886) (Sauria: Lacertidae), from Northeastern Anatolia, Turkey Mehmet Kürşat ŞAHİN, Yusuf KUMLUTAŞ, Çetin ILGAZ	041001 (551-557)
--	-------------------------

FİZİK / PHYSICS (11)

Araştırma Makalesi / Research Article GaAs Alttaş Üzerine Büyütülen GaAs/GaAlAs Heteroyapılarının Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım Yöntemi Kullanılarak Karakterizasyonu Characterization of GaAs/GaAlAs Heterostructures Grown on GaAs Substrate using High Resolution X-ray Diffraction Method Habibe SAYRAÇ, Muhammed SAYRAÇ, Sezai ELAĞÖZ	041101 (558-564)
--	-------------------------

KİMYA / CHEMISTRY (12)

Araştırma Makalesi / Research Article İmin Grupları Taşıyan Fenoksi Sübstitüe Siklotrifosfazen Türevleri ile Ağır Metal İyonları Giderimi Removal of Heavy Metal Ions with Phenoxy Substituted Cyclotriphosphazene Derivatives Bearing Imine Tahsin ÖZER, Tuba ERDOĞAN, Ali İhsan ÖZTÜRK	041201 (565-575)
Araştırma Makalesi / Research Article [BW12O4O]3- ve 2,2'-Bipiridil İçeren Yeni Bir Nikel(II) Kompleksinin Sentezi ve Karakterizasyonu Synthesis and Characterization of a New Nickel(II) Compound Derived from [BW12O4O]3- and 2,2'-Bipyridyl Mükerrem FINDIK, Asuman UÇAR, Nuriye KOÇAK, Onur ŞAHİN, Alper Tolga ÇOLAK	041202 (576-581)

Araştırma Makalesi / Research Article Genişletilmiş Deneme Denklemi Yöntemi ile Kübik Lineer Olmayan Schrödinger Denklemine Yeni Tam Çözümleri New Exact Solutions of Cubic Nonlinear Schrödinger Equation by Using Extended Trial Equation Method Yusuf PANDIR, Tural AĞIR	041301 (582-588)
---	-------------------------

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

Araştırma Makalesi / Research Article Evsel ve Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Toprak Düzenleyici Etkisinin Değerlendirilmesi Evaluation of Soil Conditioner Effects of Domestic and Domestic-Like Wastewater Sludges Fatma Olcay TOPAÇ ŞAĞBAN, Esra DEMİR	045401 (589-597)
--	-------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article Global ve Bölgesel (Yüksek Çözünürlüklü) Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Analizi Üzerine Bir İnceleme An Investigation on Accuracy Analysis of Global and Regional (High Resolution) Digital Elevation Models Bihter EROL, Mustafa Serkan IŞIK, Serdar EROL	045501 (598-612)
Araştırma Makalesi / Research Article GNSS Tabanlı Tektonik Uygulamalar için Çevirim İçi Bir Servis: Tektonik Araçlar An Online Service for GNSS-Based Tectonic Applications: Tectonic Tools Halil İbrahim SOLAK, İbrahim TİRYAKİOĞLU	045502 (613-622)
Araştırma Makalesi / Research Article Burdur Gölü Kıyı Şeridindeki Değişiminin Uzaktan Algılama ile Haritalanması Mapping Burdur Lake Shoreline Changes Using Remote Sensing Aslı SABUNCU	045503 (623-633)

Araştırma Makalesi / Research Article Sürdürülebilir Kentsel Gelişme için CBS Tabanlı Arazi Uygunluk Analizi: Eskişehir Örneği GIS-Based Land Suitability Analysis for Sustainable Urban Development: A Case Study in Eskişehir, Turkey Sayed Ishaq DELIRY, Hakan UYGUÇGİL	045504 (634-650)
--	-------------------------

İNŞAAT & ULAŞTIRMA / CIVIL ENGINEERING & TRANSPORTATION (56)

Araştırma Makalesi / Research Article Karlı Dağlık Bir Havzada Günlük ve Aylık Akım Değerlerinin SWAT Modeliyle Değerlendirilmesi: Bitlis Çayı Havzası Örneği Evaluation of Daily and Monthly Streamflow Rates in a Snowy Mountainous Watershed with SWAT Model: A Case of Bitlis Creek Basin Emrah YALÇIN	045601 (651-671)
--	-------------------------

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

Araştırma Makalesi / Research Article Eş Kanallı Açısal Pres (EKAP) Yöntemi ile Şekillendirilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri ve Makroskobik Deformasyon Davranışı Arasındaki İlişki Relationship between Mechanical Behavior and Macroscopic Deformation Mode of Ti-6Al-4V Alloy Processed by ECAP Çağatay ELİBOL	045701 (672-682)
--	-------------------------

MADEN & JEOLJİ / MINES, & GEOLOGICAL (58)

Araştırma Makalesi / Research Article Bayatcık Jeotermal Sahasında (Afyonkarahisar) Yer Alan Bayatcık-1 Kuyusunun Jeolojisi ve Alterasyon Mineralojisi Borehole Geology and Alteration Mineralogy of Well Bayatcık-1, Bayatcık Geothermal Area, Afyonkarahisar Ahmet YILDIZ, Can BAŞARAN, Metin BAĞCI, Alper DÜLGER, Yusuf ULUTÜRK	045801 (683-692)
Araştırma Makalesi / Research Article Batı Anadolu'da Genişleme Alanı Tipi Jeotermal Ortamın Varlığına Dair Yapısal Veriler: Afyon-Akşehir Grabeni'nden Örnek Bir Çalışma Structural Evidence For Extensional Domain-Type Geothermal Play In Western Anatolia: A Case Study From Afyon-Akşehir Graben Çağlar ÖZKAYMAK, Hasan SÖZBİLİR	045802 (693-702)

Araştırma Makalesi / Research Article Ballica (Elazığ Güneyi, Doğu Anadolu) Civarındaki Denizel Sedimanter Kayaçların Jeokimyasal Özellikleri Geochemical Properties of the Marine Sediments Around the Ballica (Southern Elazığ) Dicle BAL AKKOCA, Gizem ÇETİNTAŞ	045803 (703-717)
--	-------------------------

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

Araştırma Makalesi / Research Article İki Boyutlu Çatlak Poblemlerinde J İntegralin Sayısal Çözümü Numerical Solution of J Integral in Two Dimensional Crack Problems Mete Onur KAMAN, Ahmet Murat AŞAN	045901 (718-729)
Araştırma Makalesi / Research Article Panik Frenleme Davranışının Yarım Taşıt Test Cihazında İncelenmesi The Investigation of Emergency Brake Behaviour with Half Vehicle Test Device Hüseyin BAYRAKÇEKEN, Tuğçe TÜRK BAY, Faruk Emre AYSAL, Hicri YAVUZ	045902 (730-740)

DİSİPLİNLER ARASI / INTER DISCIPLINARY (71)

Araştırma Makalesi / Research Article Rüzgâr Enerji Santrali Projelerinde Topografik Yersel Ölçme ve Gözlemlerden Kaynaklanan Risklerinin İncelenmesi Research of the Risks that are Originated from Topographic Terrestrial Observations in Wind Energy Power Plant Projects Eray CAN, Hikmet ERBIYIK	047101 (741-752)
--	-------------------------

MÜHENDİSLİK DİĞER / OTHER ENGINEERING (72)

Araştırma Makalesi / Research Article Vigna caracalla L. Verdc. Bitkisinde In Vitro Klonal Mikroçoğaltım In Vitro Clonal Micropropagation of Vigna caracalla L. Verdc. Halide Hande GÜNGÖR, Begüm GÜLER, Meltem BAYRAKTAR, Aynur GÜREL	047201 (753-767)
--	-------------------------

Sexual Dimorphism In Spiny - tailed Lizard, *Darevskia rudis* (Bedriaga, 1886) (Sauria: Lacertidae), from Northeastern Anatolia, TurkeyMehmet Kürşat ŞAHİN^{1*}, Yusuf KUMLUTAŞ^{2,3}, Çetin ILGAZ^{2,3}¹ Karamanoglu Mehmetbey University, Kamil Ozdag Faculty of Science, Department of Biology, Karaman² Dokuz Eylul University, Faculty of Science, Department of Biology, Buca, İzmir³ Dokuz Eylul University, Fauna and Flora Applied and Research Center, Buca, İzmir

* Sorumlu yazar e-posta: yasambilimci.kursat@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0834-5081

yusuf.kumlutas@deu.edu.tr ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1154-6757

cetin.ilgaz@deu.edu.tr ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7862-9106

Geliş Tarihi: 05.04.2020

Kabul Tarihi: 20.07.2020

Abstract**Keywords**
Sexual dimorphism;
Darevskia rudis;
metric; meristic;
statistical analysis;
Turkey.

Detailed investigations carried out on *Darevskia rudis* (Bedriaga, 1886) populations from Northeastern Anatolia, Turkey to identify sexual dimorphism. 11 morphometric and 30 meristic features of 317 specimens were analyzed. Seven meristic (Ventral width, Dorsals attached ventrals at mid-trunk, Femoral pores, Subdigital lamellae left, Tibial scales, Dorsalia). and four metric (Pileus length, Pileus width, Head length, Head width) characters were significant in sexual dimorphism pattern ($p < 0.05$). Males have relatively longer head sizes, and related to this snout-vent length than females. Furthermore, it was found that the number of femoral pores are also higher in males than females because signaling compounds might be released in breeding seasons.

Kuzeydoğu Anadolu'daki Trabzon Kertenkelesi, *Darevskia rudis* (Bedriaga, 1886) (Sauria: Lacertidae) Türünde Eşeyssel Dimorfizm**Öz****Anahtar kelimeler**
Eşeyssel dimorfizm;
Darevskia rudis;
metrik; meristik;
istatistiksel analiz;
Türkiye

Eşeyssel dimorfizmi belirlemek için Kuzeydoğu Anadolu'dan *Darevskia rudis* (Bedriaga, 1886) popülasyonları üzerinde detaylı yapılan araştırmada 317 örneğin 11 morfometrik ve 30 meristik özelliği analiz edilmiştir. Yedi meristik (Ventral genişlik, gövdedeki ventrale bağlanan dorsalia sayısı, Femoral porlar, Sol subdijital lamel, Tibial plaklar, Dorsalia). ve dört metrik (Pileus uzunluğu, Pileus genişliği, Kafa uzunluğu, Kafa genişliği) karakterleri eşeyssel dimorfizm açısından anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Erkeklerin kafa boyutları nispeten daha uzundur ve bunla ilgili olarak Baş+Gövde uzunlukları da dişilerden daha fazladır. Ayrıca eşeyssel çağrı bileşikleri de üreme dönemlerinde salındıklarından dolayı femoral por sayılarının erkeklerde dişilerden daha fazla olduğu bulunmuştur.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

The spiny tailed lizard, *Darevskia rudis* (Bedriaga, 1886), is distributed central and northern coastal region of Anatolia, Turkey, Georgia, Armenia, Russia and Azerbaijan, therefore it is one of the representative faunal elements of the Black Sea region of Anatolian Peninsula (Arribas et al. 2013). Due to its relatively wide range distribution, it can be a good model for different aspects of

evolutionary studies, such as sexual dimorphism. The sexual dimorphism phenomenon has been relatively well studied in lacertid lizards especially for the last two decades (Herrel et al. 1999; Heidari et al. 2012; Oraie et al. 2013; Karamiani et al. 2015). This phenomenon in lizards is thought to have serious effects on behavior, size and shape characteristics (Carothers 1984). According to Rensch's rule, males display higher phenotypic

plasticity in body size than females (Fairbairn 1997). In addition to that, males generally have larger head size and longer tail lengths in lizards (Verwajen et al. 2002). Therefore, in present study, we would like to investigate whether *D. rudis* displays sexual dimorphism in different characters, that has not been studied before for this species.

2. Materials and methods

Field surveys were carried out in the Black Sea region of Anatolian Peninsula between 2000 and 2003. A total of 317 specimens (166 ♂♂ and 151 ♀♀) were collected and they were deposited in the Fauna and Flora Research and Application Centre of Dokuz Eylül University (Buca-İzmir). The specimens were examined based on 11 morphometric and 30 meristic characters. The presence/absence of a hemipenis retracted in the hemipenial sack at the base of the tail were used to assess specimen's sex (Başoğlu and Baran. 1977). Morphometric characters are as follows: Pileus length (PL), Pileus width (PW), Head length (The following metric dimensions were taken using dial calipers with accuracy to the nearest 0.01 mm: Snout-vent length (SVL): from tip of snout to anal cleft. Tail length (TL): from anal cleft to tip of tail. Pileus width (PW): at widest point between parietal plates. Pileus length (PL): tip of snout to posterior margins of parietals. Head width (HW): at widest point of head. Head length (HL): tip of snout to posterior margin of ear opening. Furthermore, morphometric ratios and indexes were calculated, Snout-vent/Tail length (SVL/Ta), Tail length/Total length (Ta/T), Pileus index (PI) [(PL / PW)] and Head index (HI) [(HL / HW)].

Meristic scalation characters considered here consisted of the following counts: Supraciliar granules (left-right) (ScgL-ScgR), Supraciliar plates (left-right) (ScL-ScR), Supralabial plates (left-right) (SupL-SupR), Sublabial plates (left-right) (SubL-SubR), transversal series of gular scales between inframaxillary symphysis and collar (MG), Collaria (C), Supratemporal scales (ST), temporal scales 1 (transversal rows of temporal scales between masseteric and tympanic) (left-right) (MaTyL-MaTyR), temporal scales 2 (longitudinal rows of

temporal scales between supratemporal and masseteric) (left-right) (MasSupL-MasSupR), Posttemporal plates (left-right) (PostTL-PostTR), Ventral plates (transversal and longitudinal) (VenLeng and VenWid), dorsals attached ventrals at mid-trunk (VenattDor), Preanals 1 (number of preanals located anterior of anal plate) (Pra1), Preanals 2 (number of preanals surrounding anal plate) (Pra2), Femoral pores (left-right) (FPL-FPR), longitudinal rows of scales on ventral surface of thigh between the femoral pores and the outer row of enlarged scales (left-right) (FPopL-FPopR), Subdigital lamellae in the 4th toe (left-right) (SDLL-SDLR), Tibial scales (scales lying on dorsal surface of ankle between the large scales (TS) and transversal series of dorsal scales at the midtrunk (Dor). Meristic characters were counted under a stereomicroscope.

Statistical analyses were performed using R Software version 3.6.1 (R. Core Team 2019). The significance level for all statistical tests was set at $p < 0.05$. In the first part of analysis, the whole raw data was examined in Kolmogorov-Smirnov test and it was found that morphological characters were not normally distributed. After that, these characters were logarithmically transformed. To uncover dispersal patterns among all characters, descriptive statistical parameters including minimum, maximum, mean, standard deviation, ANOVA were established for each sex separately in Table 1. Moreover, the homogeneity of variances was also tested to filter the best reflected parameters in sexual dimorphism, as the threshold level is 0.1 (Table 1). Finally, we performed a principal component analysis (PCA) to evaluate the contribution of statistically significant characters in the patterns of sexual dimorphism (Table 2).

Table 1. Descriptive analysis including minimum, maximum, mean, standard deviation, Test of Homogeneity of Variances (Test of HV^a) and ANOVA (A^b) of each metric and meristic characters. ANOVA and Test of Homogeneity of Variances based intra-sexual comparisons in *Darevskia rudis* (Male N= 166, Female N=151). p values are printed in **bold**.

	Male			Female			Statistics	
	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range	Test of HV ^a (Sig.)	A ^b (Sig.)
	ScgR	10.5	2.09	4-14	10.6	1.93	5-15	0.555
ScgL	10.4	2.02	4-14	10.7	2.12	2-15	0.991	0.242
ScR	6.26	0.76	4-9	6.15	0.69	4-8	0.093	0.198
ScL	6.18	0.70	4-8	6.11	0.66	4-8	0.406	0.337
SuplR	4.04	0.32	3-5	4.02	0.27	3-5	0.06	0.403
SuplL	4.07	0.34	3-5	4.02	0.25	3-5	0.003	0.181
SublR	6.14	0.53	5-8	6.13	0.42	5-7	0.143	0.824
SublL	6.13	0.48	5-8	6.04	0.39	5-7	0	0.066
MG	27.58	2.66	21-35	27.04	2.62	19-34	0.513	0.071
C	9.50	0.99	6-12	9.50	1.08	6-13	0.196	0.982
ST	2.93	0.42	1-4	2.86	0.50	1-4	0.009	0.132
Ma TyR	2.27	0.69	1-4	2.15	0.63	1-4	0.031	0.118
Ma TyL	2.26	0.73	1-5	2.16	0.63	1-4	0.03	0.208
Post TR	3.80	0.81	2-6	3.90	0.77	2-6	0.322	0.297
Post TL	3.80	0.79	2-6	3.88	0.81	2-6	0.927	0.375

	Male		Female		Statistics			
	Mean	SD	Mean	SD	Test of HV ^a (Sig.)	A ^b (Sig.)	Test of HV ^a (Sig.)	A ^b (Sig.)
Ven Leng	6	0	6	6	0	6	.	.
Ven Wid	23.31	1.23	20-27	25.47	1.14	21-28	0.912	0
Ven att Dor	26.12	3.42	20-33	24.86	3.34	20-30	0.776	0.001
Pra1*	1.20	0.44	1-3	1.37	0.56	1-3	0	0.003
Pra2*	6.99	1.03	5-10	7.33	1.05	5-10	0.057	0.004
FPR	19.64	1.79	15-26	18.75	1.67	15-24	0.318	0
FPL	19.54	1.78	15-26	18.66	1.74	10-24	0.492	0
FP opR*	5.32	0.57	4-6	5.06	0.60	4-6	0.011	0
FP opL*	5.32	0.57	4-6	5.06	0.60	4-6	0.011	0
SDLR	26.30	1.88	23-32	25.98	1.75	22-30	0.21	0.11
SDLL	26.42	1.87	23-32	25.97	1.69	22-30	0.113	0.027
Mas SupR	1.72	0.61	1-3	1.79	0.71	1-3	0.056	0.373
Mas SupL	1.69	0.61	1-3	1.77	0.69	1-3	0.197	0.296
TS	14.86	1.93	10-19	14.18	1.99	10-19	0.531	0.002
Dor	49.71	6.40	38-64	47.11	5.60	38-61	0.115	0
PL	16.36	1.98	11.3-21.6	14.41	1.51	11.7-18.6	0.397	0
PW	8.61	1.03	6.2-11.3	7.61	1.70	6-9.94	0.443	0
HW	10.42	1.44	7.1-14.6	9.00	7.42	6.5-12.4	0.963	0

	Male		Female			Statistics			
HL	17.75	2.20	12.1-23.2	15.54	13.79	12.6-20.1	0.487	0	
SVL	68.18	7.87	45.4-88.5	67.23	21.17	50.9-89.2	0.944	0.293	
TaL ***	131.7	16.23	94-176	121.5	3	2.27	84-149	0.891	0.002
TL***	205.4	23.89	151.2-264.5	-	191.8	7	2.83	134.9	0.007
PI	52.56	2.06	47.8-59.5	52.86	0.03	46.4-61.7	0.933	0.504	
HI**	58.78	2.49	51.9-65.4	58.08	0.03	49.02	-64.1	0.106	0.006
SVL/ Ta ***	0.53	0.03	0.46-0.62	0.55	0.01	0.49-0.63	0.308	0.002	
Ta/ T***	0.65	0.02	0.62-0.69	0.65		0.61-0.67	0.279	0.004	

*: not selected because its test of homogeneity of variance value is lower than threshold (0.1)

** : not selected because HI is derived from HL and HW, which have already been in analysis

***: not selected because many specimens did not have tails

3. Results and discussion

Differences between males and females were found in seven meristic (transverse series of ventral plates, dorsal scales attached ventral plates at mid-trunk, Femoral pores, Subdigital lamellae left, Tibial scales, and Dorsal scales). and four metric (Pileus length, Pileus width, Head length, Head width) characters as identified by PCA. The PCA showed that the first three principal components explained 85.6% of variation between genders. Of this, 57.45% explained by PC1 in which TS and Dor are mainly responsible for this variation; 19.81% is explained by PC2 in which VenWid, FPR, FPL, SDLL, PL, PW, HL and HW are responsible for the variation; and finally 8.37% is explained by PC3 in which VenattDor is mainly responsible for this variation (Figure 1).

Table 2. Factors loadings on the first five principal components analysis of metric and meristic characters in *Darevskia rudis*. Strong loadings on each principal component are shown in **bold**.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
VenWid	0.043201	-0.25277	-0.0069	-0.09833	0.001746
VenattDor	-0.3577	0.247178	-0.85206	0.227636	-0.06671
FPR	-0.01162	0.259356	-0.01515	-0.62048	-0.20686
FPL	-0.01337	0.282081	-0.05728	-0.57877	-0.20792
SDLL	-0.03435	0.219593	-0.14193	-0.28248	0.70369
TS	-0.19561	-0.11165	-0.02582	-0.0177	-0.61987
Dor	-0.90381	0.003038	0.389045	-0.01594	0.12433
PL	0.060558	0.468694	0.183447	0.212296	-0.05777
PW	0.040609	0.239261	0.095179	0.127022	-0.04264
HW	0.055793	0.334547	0.125968	0.156788	-0.07606
HL	0.071616	0.527864	0.199217	0.228888	-0.06092
Eigenvalues	12.3251	4.2859	1.7993	1.1351	0.7457
Standard deviation	6.7275	3.951	2.5678	2.03344	1.65389
Proportion of Variance	0.5745	0.1981	0.0837	0.05249	0.03472
Cumulative Proportion	0.5745	0.7726	0.8563	0.90884	0.94356

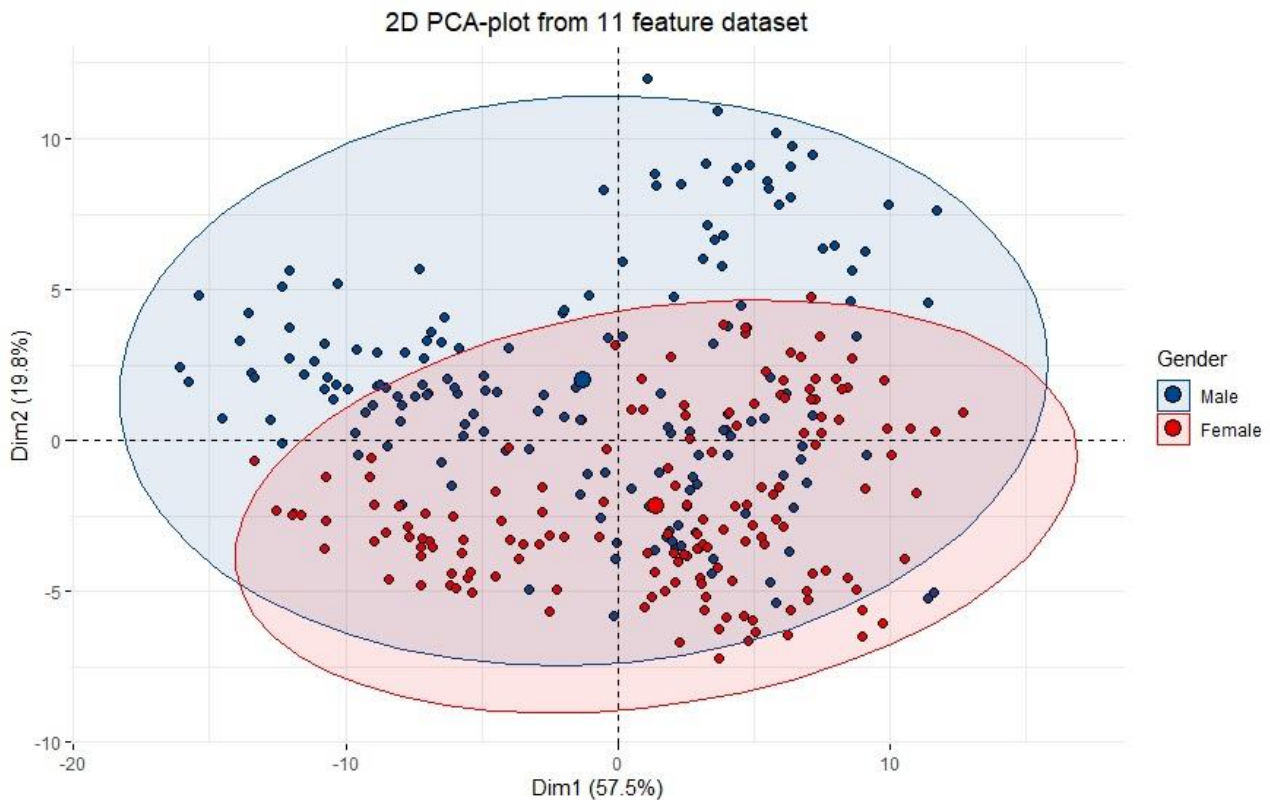


Figure 1. Ordination of the individual males and females of *Darevskia rudis* in the first two principle components.

Comparative studies on sexual dimorphism (SD) should generally include body size as a potential determinant (Fairbairn et al. 2007) and reproductive output is related with morphological features in reptiles (Heidari et al. 2012; Dehghani et al. 2014; Karamiani et al. 2015). Especially combat success is generally positively correlated with larger body size (Olsson 1992; Heidari et al. 2012). According to Rensch's rule, sexual size dimorphism (SSD) characteristically increase with size when males are the larger sex (Cox et al. 2003; Fairbairn et al. 2007; Karamiani et al. 2013).

According to our data, it was obvious that males of *Darevskia rudis*, showed longer SVL and TL than females even in relatively less individual comparisons. Besides, it is universal that male lacertids have a relatively larger head size than females (HL, HW, PL and PW) (Huang 1998; Molina-Borja et al. 2010; Dehghani et al. 2014; Karamiani et al. 2015). Males with larger heads could produce greater bite force as ammunition in combat (Lappin and Husak 2005). Furthermore, due to noteworthy reproductive success, males tend to have more spacious and better space. That's why females have

a tendency to prefer larger sized males (Chang and Oh 2012). This pattern is well observed in our data with HW, HL, PW and PL are higher in *D. rudis* males than females (Table 1.).

On the other hand, femoral pores and ventral scales are also useful characters to distinguish males and females in lacertids (Heidari et al. 2012; Dehghani et al. 2014). Males have femoral pores with holocrine secretion that is abundant only in the reproductive period, that play an important role in sexual selection because of their contribution to signaling mechanisms (Martín and López 2006; Gabriot et al. 2008; Iraeta et al. 2011). Here, our results supported this process as males (mean=19.59) have more femoral pores in both legs than females (mean=18.70), and this suggested that males are endeavoring to discharge signaling compounds to find an appropriate mate.

According to an overall evaluation of all these results, we may conclude that *D. rudis* shows the classic pattern of lacertid sexual dimorphism.

4. References

- Arribas, O., Ilgaz, Ç., Kumlutaş, Y., Durmuş, S.H., Avcı, A. and Üzüm, N., 2013. External morphology and osteology of *Darevskia rudis* (Bedriaga, 1886), with a taxonomic revision of the Pontic and Small-Caucasus populations (Squamata: Lacertidae). *Zootaxa*, **3626**:401–428.
- Baçoğlu, M. and Baran, İ., 1977. Türkiye Sürüngenleri, Kısım I, Kaplumbağa ve Kertenkeleler [Turkish Reptiles. Part I. Turtles and Lizards], Ege Üniversitesi Kitaplar Serisi, **76**: 1-219 (in Turkish).
- Carothers, J.H., 1984. Sexual selection and sexual dimorphism in some herbivorous lizards. *The American Naturalist*, **124**:244–254.
- Chang, M.-H. and Oh, H.-S., 2012. Sexual Size Dimorphism of Lacertid Lizards from Korea1. *한국환경생태학회지*, **26**:668–674.
- Cox, R.M., Skelly, S.L. and John-Alder, H.B., 2003. A comparative test of adaptive hypotheses for sexual size dimorphism in lizards. *Evolution*, **57**:1653–1669.
- Dehghani, A., Hosseinian Yousefkhani, S.S., Rastegar-Pouyani, N., Banan-Khojasteh, S.M. and Mohammadpour, A., 2014. Sexual size dimorphism in *Darevskia raddei* (Sauria: Lacertidae) from northwestern Iran. *Zoology in the Middle East*, **60**:120–124.
- Fairbairn, D.J., 1997. Allometry for sexual size dimorphism: pattern and process in the coevolution of body size in males and females. *Annual review of ecology and systematics*, **28**:659–687.
- Fairbairn, D.J., Blanckenhorn, W.U. and Székely, T., 2007. Sex, size and gender roles: evolutionary studies of sexual size dimorphism. Oxford University Press, 1-266.
- Gabirot, M., Lopez, P., Martin, J., De Fraipont, M., Heulin, B., Sinervo, B. and Clobert, J., 2008. Chemical composition of femoral secretions of oviparous and viviparous types of male common lizards *Lacerta vivipara*. *Biochemical Systematics and Ecology*, **36**:539–544.
- Heidari, N., Faizi, H. and Rastegar-Pouyani, N., 2012. Sexual dimorphism in Blanford's Fringe-toed Lizard, *Acanthodactylus blanfordi* Boulenger, 1918, from Southern Iran: (Sauria: Lacertidae). *Zoology in the Middle East*, **55**:35–40.
- Herrel, A., Spithoven, L., Van Damme, R. and De Vree, F., 1999. Sexual dimorphism of head size in *Gallotia galloti*: testing the niche divergence hypothesis by functional analyses. *Functional Ecology*, **13**:289–297.
- Huang, W.-S., 1998. Sexual Size Dimorphism and Microhabitat Use of Two Sympatric Lizards, *Sphenomorphus taiwanensis* and *Takydromus hsuuehshanensis*, from the Central Highlands of Taiwan. *Zoological Studies-Taipei*, **37**:302–308.
- Iraeta, P., Monasterio, C., Salvador, A. and Diaz, J.A., 2011. Sexual dimorphism and interpopulation differences in lizard hind limb length: locomotor performance or chemical signalling? *Biological Journal of the Linnean Society*, **104**:318–329.
- Karamiani, R., Dabid, S. and Rastegar-Pouyani, N., 2015. Sexual Dimorphism of the Yassujian Lizard, *Apathya yassujica* (Nilson et al, 2003)(Sauria: Lacertidae) from Iran. *Amphibian and Reptile Conservation*, **9**:42–48.
- Karamiani, R., Rastegar-Pouyani, N., Fattahi, R. and Fathinia, B., 2013. Sexual dimorphism in leaf-toed gecko *Asaccus elisae* (Werner, 1895)(Sauria: Gekkonidae) from western Iran. *Hamadryad*, **36**:157–161.
- Lappin, A.K., and Husak, J.F., 2005. Weapon performance, not size, determines mating success and potential reproductive output in the collared lizard (*Crotaphytus collaris*). *The American Naturalist*, **166**:426–436.
- Martín, J., and López, P. 2006. Interpopulational differences in chemical composition and chemosensory recognition of femoral gland secretions of male lizards *Podarcis hispanica*: implications for sexual isolation in a species complex. *Chemoecology*, **16**:31–38.
- Molina-Borja, M., Rodríguez-Domínguez, M.A., González-Ortega, C. and Bohórquez-Alonso, M.L., 2010. Sexual size and shape dimorphism variation in Caesar's lizard (*Gallotia caesaris*, Lacertidae) from different habitats. *Journal of Herpetology* **44**: 1–12.
- Olsson, M., 1992. Contest success in relation to size and residency in male sand lizards, *Lacerta agilis*. *Animal behaviour*, **44**:386–388.

- Oraie, H., Rahimian, H., Rastegar-Pouyani, N., Khosravani, A. and Rastegar-Pouyani, E., 2013. Sexual size dimorphism in *Ophisops elegans* (Squamata: Lacertidae) in Iran. *Zoology in the Middle East*, **59**:302–307.
- R. Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing, R foundation for statistical computing. Vienna: R Core Team; 2019.
- Verwajen, D., Van Damme, R. and Herrel, A., 2002. Relationships between head size, bite force, prey handling efficiency and diet in two sympatric lacertid lizards. *Functional Ecology*, **16**:842–850.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 041101 (558-564)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 041101 (558-564)

DOI: 10.35414/ akufemubid.707628

Araştırma Makalesi / Research Article

Characterization of GaAs/GaAlAs Heterostructures Grown on GaAs Substrate using High Resolution X-ray Diffraction Method

Habibe SAYRAÇ^{1,2*}, Muhammed SAYRAÇ³, Sezai ELAGÖZ⁴¹Department of Physics, Faculty of Science, Gazi University, 06500 Ankara, Turkey.²Vocational School of Health Services, Ankara Medipol University, 06050 Ankara, Turkey.³Department of Physics, Faculty of Science, Cankiri Karatekin University, 18100 Cankiri, Turkey.⁴AELSAN-Microelectronics, Guidance & Electro-Optics, Ankara, Turkey.

Sorumlu yazar e-posta: habibe.sayrac@gazi.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4566-7736>

muhammedsayrac@karatekin.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4373-6897>

elagoz@cumhuriyet.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3600-8640>

Geliş Tarihi: 23.03.2020

Kabul Tarihi: 21.08.2020

Abstract

Characterization of nanostructures using X-ray diffraction (XRD) method gives information on the composition, the lattice strain, and heteroepitaxial layers of the structures. These information are useful for fabrication process of optoelectronic devices. In this paper, we give fundamental description to the commonly used material, GaAlAs. In addition, the importance of X ray diffraction method for characterization of the materials provides crucial information for the growth and development process of the materials. Structural characterization of epitaxial growth GaAs/GaAlAs heterostructures are analyzed using the X- ray diffraction (XRD) method. Rigaku Global Fit simulation program is performed to compare the experimental results, and the simulation and the experimental results agree with each other.

Keywords

GaAs; GaAs/GaAlAs;
XRD; MBE; Epitaxial
Growth

GaAs Alttaş Üzerine Büyütülen GaAs/GaAlAs Heteroyapılarının Yüksek Çözünürlüklü X- Işını Kırınım Yöntemi Kullanılarak Karakterizasyonu

Öz

Nano yapıların X- ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak karakterizasyonu, bu yapıların bileşimi, örgü zorlanması ve heteroepitaksiyel katmanları hakkında bilgi verir. Bu bilgiler optoelektronik cihazların üretiminde önemli rol oynamaktadır. Bu makalede, yaygın olarak kullanılan GaAlAs malzemesi hakkında genel bilgilerden bahsedilmektedir. Ek olarak, X- ışını kırınım yönteminin malzemelerin karakterizasyonu için önemi, malzemelerin büyüme ve yapının oluşum süreci hakkında önemli bilgiler sağlamasıdır. Epitaksiyel olarak büyütülmüş GaAs/GaAlAs heteroyapılarının yapısal karakterizasyonu X- ışını kırınım yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Deneysel sonuçları karşılaştırmak için Rigaku Global Fit simülasyon programı kullanıldı, simülasyon ile deneysel sonuçların yüksek oranda uyumlu olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler

GaAs; GaAs/GaAlAs;
XRD; MBE; Epitaksiyel
Büyütme

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

GaAlAs materials have been well known for their suitability for optical devices, for example, solar cells, laser diodes and light emitting diodes because of their band gap structure and high mobility (Liu et al. 2012, Kish et al. 1991, Kato et al. 1991, Neamen 2003). The promise of these devices has led to numerous studies to obtain more effective structures using progressive growth

systems (Thompson 1997, Liu et al. 2004). GaAs substrate has absorbing properties Schubert (2006), however, it has been preferred for fabricating optical device based on GaAlAs material because of that GaAs is lattice matched with GaAlAs material (Schubert 2006).

Ga and As are elements from groups III and V in the periodic table and are direct band gap semiconductors. Electrons emitting or absorbing

photons travel between the valance and the conduction band. These materials can be used in diode lasers, and the emitted wavelength is determined from the band gap of the material. The sophisticated growth techniques make possible a crystal perfectly grown using a mixture from groups III and V elements. Mixture of GaAs with AlAs gives

AlGaAs ternary compound, which has useful features. The band gap of GaAs is different from that of AlAs. The band gap value can be chosen by controlling the proportions of Ga and Al in the compound. Thus, the emitted wavelength by the laser can be tuned that results important applications on laser based devices (Hayashi and Marcon 2000).

X-ray diffraction systems are used to determine the characteristic structural parameters of artificial semiconductor-based super lattices (Horikoshi et al. 1986, Auvray et al. 1987). The growth of a structure requires very high precision methods such as metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) or molecular beam epitaxy (MBE) system. The growth process needs to be checked whether the structure is growth the way it is supposed to be. The control of the crystal structure is performed by using X-Ray Diffraction (XRD) method. The structural feature obtained by the epitaxial growth process is necessary to know for researchers working on nano heterostructures.

In this paper, we aim to analyze structural characterization of epitaxial growth GaAs/GaAlAs heterostructures using the X- ray diffraction (XRD) method. In addition, the simulation of XRD data is performed by Rigaku Global Fit simulation program. The experimental and the computational results are compared, and they are in close agreement. Even though there are many researches have been completed using XRD method, it is important to find best structural properties of the nanostructure.

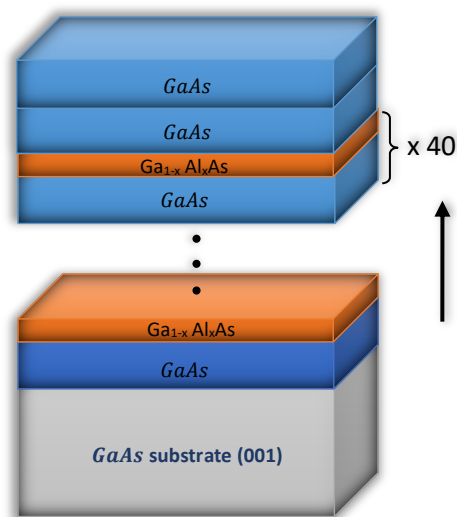


Figure 1. Schematic demonstration of the GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure.

2. Experimental

The GaAlAs structure were grown on a GaAs substrate using molecular beam epitaxy (MBE) system. The Figure 1 presents demonstration of GaAs/ Ga_{1-x}Al_xAs superlattice structure, which four different alloy ratios of each repeated 10 times growth by MBE crystal growth technique, on the (001) crystal oriented GaAs substrate. The nanostructures obtained by epitaxial crystal growth methods are subsequently obtained by using various lithography techniques. The epitaxial crystal growth is based on the growth parameters, which directly affect the crystal quality such as uniformity and crystal thickness. These parameters directly affect the structural, electrical, and optical properties of the crystal.

The crystallization and growth direction for the GaAlAs structure grown on GaAs substrate were measured by using the θ -2 θ scan, ω scan, and Φ scan. The experimental results are compared with the simulation results which are in agreement with each other.

3. Results and Discussion

Rigaku SmartLab X-ray diffractometer is used to analyze the structural properties of the growth structure. The device performs structural analysis of thin films, dust and bulk samples. To generate the X-ray source, copper (Cu) target with rotating

anode is used. The wavelength of X-rays is $K_{\alpha 1} = 0.154059$ nm, and its power is 9 kW (max voltage 45 kV, max current 200mA).

The X-ray diffraction analysis comes from fundamental the Bragg law (Ashcroft and Mermin 1976)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

here n is a positive integer, λ is the wavelength of the source used for characterization, θ is the angle between incident ray and the scatter plane, and d is the spacing of the crystal layers (Quinn and Yi 2009).

The relationship between the spacing of the layers and the lattice constant for cubic crystal structure are given law (Ashcroft and Mermin 1976)

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2)$$

where d is the spacing of the crystal layers, a is the lattice constant and h, k, l are Miller indices (Pahuja 2005). By using the experimental result, information about the structure of thin multi-layer structure such as lattice constant, stacking, crystal structure, roughness, lateral coherence length, change of layer thickness, sharpness of interfaces, diffusion between layers, vertical stress and crystallographic orientation of materials are obtained from X-ray diffraction pattern. The experimental results could be compared well known Bragg formula, Eq. 1 and Eq. 2.

The experimental results are characterized using four different scan methods to understand and to investigate the properties of the structure. These scans, which are briefly described in below are important to understand the features of the GaAlAs structure.

4. X Ray Diffraction

4.1 θ - 2θ scans

The θ - 2θ scans are usually created in reflection geometry and sometimes is called as (001) scans. These radial scans allow us to scan sample planes parallel to the growth direction. In θ - 2θ scans, not only the substrate peak but also the superlattice peaks are clearly observed. The intensity of the peaks decrease from the center to the outside, and the first four satellite peaks are a clear indication that the quality of the growth process is quite good.

The difference between the theoretical and experimental lattice constant of the GaAs substrate is calculated from wide angle scans. Bragg angle for GaAs (004) was taken from the Fig. 2. Miller indices ($h=0, k=0, l=4$) and the Bragg angle are written in Eq. 1 and Eq. 2. Then the lattice constant for GaAs was found $a_{GaAs} = 5.6539\text{\AA}$, and it is in agreement with the literature ($a_{GaAs} = 5.65325\text{\AA}$) (Börnstein 1999). The relative error between the values in the literature and the calculation is 0.011%.

Figure 2 shows the scan of GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs structure from (a) 30.5° to 33°, and (b) 65.7°–66.5°. The peaks are sharp, and intensities of the peaks are decreasing from the center to the edge. These peaks are called satellite peaks, and it is a clear indication that the quality of the growth is quite good.

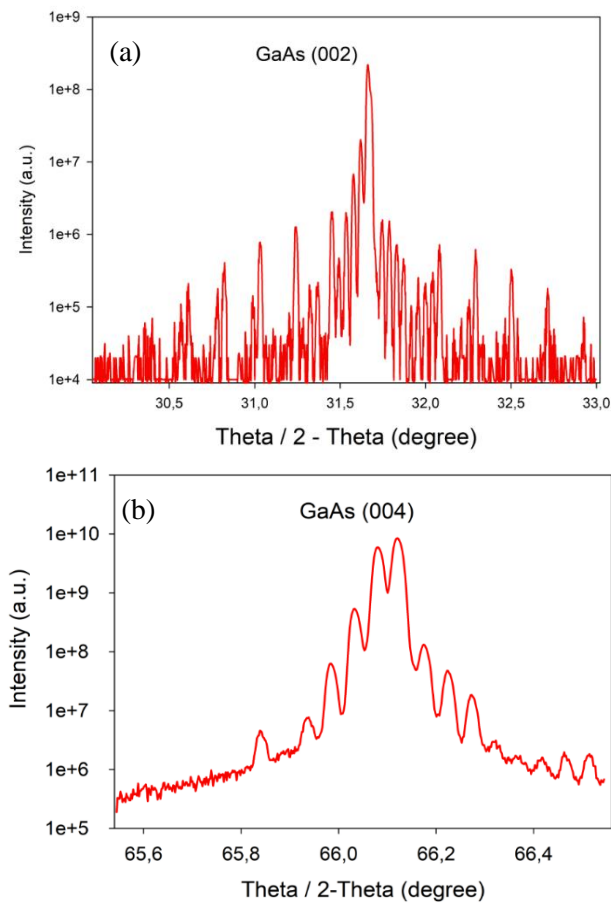


Figure 2. High-resolution θ - 2θ scan of GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure. 2θ scan is between (a) 30.5°–33°, and (b) 65.7°–66.5°.

4.2 Rocking curve scan (ω scan)

Rocking curve scan (ω scan) provides information about the roughness of the structure interfaces and the lateral coherence length. Figure 3 shows the ω scan for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure on (004) plane. As a result of the GaAs peak, the full width half maximum (FWHM) was calculated 0.01°, and the lateral coherence length was found 1611 nm. In plane scan and phi scan need to be performed for controlling the epitaxial growth, but the structure thickness is not suitable to perform in plane scan. The structure could be thinned for scanning, however it is not required since asymmetric scan gives the similar results.

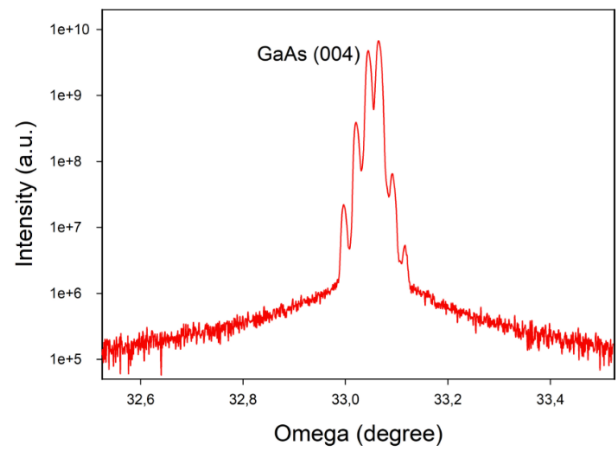


Figure 3. ω scan for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure (004) peak.

4.3 Asymmetric Scan

The lattice constant of the GaAs crystal is calculated, and lattice constant for GaAs (202) plane is found $a_{GaAs}=5.6554 \text{ \AA}$. Bragg angle is experimentally estimated from Figure 4, and the theoretical Miller indices ($h=2, k=0, l=2$) for GaAs (202) is calculated from Eq. 1 and Eq.2. The error

$$\left(\frac{|a_{\text{experiment}} - a_{\text{theory}}|}{a_{\text{theory}}} \times 100 \right) \text{ is estimated } \sim 0.038\%$$

compared to the lattice constant of GaAs in the literature ($a_{GaAs} = 5.65325 \text{ \AA}$) [14]. The lattice constants are calculated using the results of symmetric and asymmetric scans, and they are very close to each other and the literature value Börnstein (1999), showing that the growth is achieved in harmony.

An important control of epitaxial crystal growth is that in-plane peak positions of the sample and the substrate are the same. Figure 4 shows that θ - 2θ scan of GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs structure between 44.8°–45.8° on (202) plane.

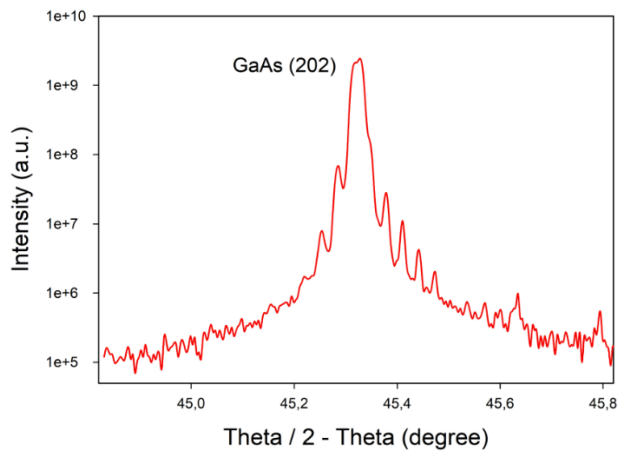


Figure 4. θ - 2θ scan for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs structure between 44.8°–45.8° on (202) plane.

4.4 Φ Scan

Phi (Φ) scan gives the investigation about the perpendicularity of the surface, curvature of the substrate, and the surface in-out plane geometry. Figure 5 shows the pattern of refraction is repetitive in every 90°. It means that the GaAs crystal has a cubic structure, and the epitaxial growth occurs. The Rigaku SmartLab X-ray diffractometer used in the asymmetrical Φ scan produces the same as intensity of the peaks (Fig. 5), and it can be concluded that the epitaxial growth of heterostructure is reasonable.

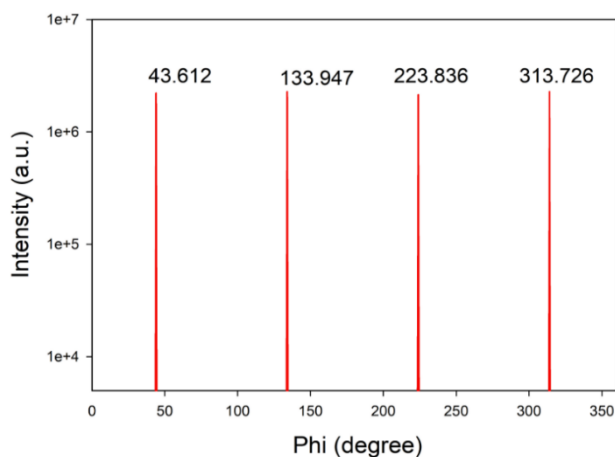


Figure 5. Φ scan for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure between 0°–360°.

5. Simulation

Simulation for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure is performed using the Rigaku GlobalFit simulation software program. The simulation program for (002) and (004) GaAs peaks are applied, and

simulation is performed for controlled parameters such as thicknesses and doping ratio. With the changing in the doping percentages for the Ga_{1-x}Al_xAs layers, the simulation better overlaps to the experiment, Figure 6. The simulation results are compared with the experimental results. The Figure 6 shows that simulation of the (002) peak for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure.

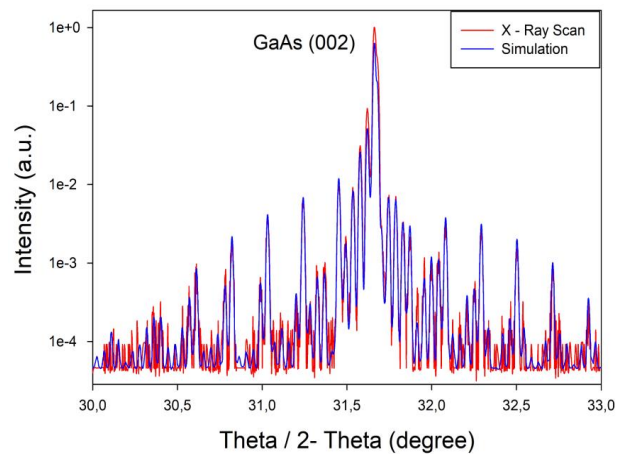


Figure 6. Simulation and experimental graphics for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs (002) peak. Red line is X-ray scan from Fig. 2 (a), and the blue line is the simulation results.

Figure 7 is that the simulation and the experimental plot of the (004) peak of GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure are performed for the angle between 65.7°–66.5°. It shows that the experimental and simulation results are in agreement with Figure 2 (b). Intensities of the peaks are normalized to unity for better comparison in Figure 6 and 7.

Optimum parameters giving best fit to experimental results are obtained, and they are presented in Table 1, which gives information about (002) and (004) peaks. The layer thickness, the doping rates and their averages are compared. Although there are not many differences between layers thicknesses in theoretical and experimental (Average Layer Thickness) values, alloy ratios are relatively different. This difference in alloy ratios determines the efficiency of the device, and they are directly linked to the quality of the devices.

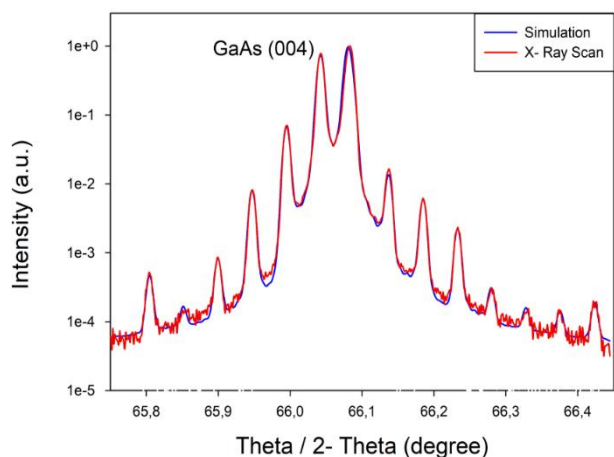


Figure 7. Simulation and experimental graphics for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs (004) peak. Red line is X-ray scan from Fig. 2 (b), and the blue line is the simulation results.

The GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure is a cubic structure because of the repetition of the peaks every 90°, Fig. 5. It has been shown that the uniformity of the crystals is good because the yields of the peaks are equally spaced, Fig 5. This underlines the fact that the X-ray diffraction method is indeed an important method of characterization, and it is an initial analyzing state to see the growth method is achieved the way it is expected before going other characterizations stage.

Table 1. Compare of the simulation and theoretical parameters for GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructures (002) and (004) peak.

Layer	Theoretical		Experimental Growth Structure				Average Doping Rate of 002 and 004 (%)	Average Layer Thickness of 002 and 004 (nm)
	Doping Rate (%)	Layer Thickness (nm)	(002)		(004)			
			Doping Rate (%)	Layer Thickness (nm)	Doping Rate (%)	Layer Thickness (nm)		
GaAs		1000		1162		1054	1108	
GaAs		50		49.8		49.5	49.6	
Ga _{1-x} Al _x As	21.0	40	31	37.3	26.5	38.2	29	37.7
GaAs		5.5		6.4		6.2	6.3	
Ga _{1-x} Al _x As	24.0	40	22.1	36.8	21	42	21.5	39.4
GaAs		5		6.4		3.6	5	
Ga _{1-x} Al _x As	30.0	40	40	37.5	42	35	41	36.3
GaAs		4		5.2		2	3.6	
Ga _{1-x} Al _x As	35.0	40	30	38.8	26.8	45	28.5	41.8
GaAs		1500		375		750	562.5	
GaAs (substrate)		Infinite		Infinite		Infinite	Infinite	

6. Conclusion

In this paper, (001) crystal-oriented GaAs on the bottom of the epitaxial growth four different alloy ratios of each repeated 10 times GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs

superlattice structure growth by MBE crystal growth technique was studied, Fig. 1. During the structural analysis, Rigaku SmartLab ultra-high resolution X-ray diffraction system was used. The

GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs structure was studied using θ -2 θ scan, ω scan, and Φ scan.

The structural characterization of GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs structure growth on GaAs substrate by MBE technique is analyzed by using XRD technique. The simulation is performed to compare to experimental results. They are in agreement with the experimental results. The presented work is important to find and to determine the structural properties of the nano structure, and it is first step whether the structure is growth the way it is expected. This works gives brief introduction of the XRD method on the scientific and engineering method. The improved result can find in application areas from light emitting diode (LED) to scientific instrument.

7. References

- Ashcroft N. W. and Mermin N. D., 1976. Solid State Physics, **116**, Saunders College Publishing, Orlando, 217.
- Auvray P., Baudet M. and Regreny A., 1987. X-ray diffraction study of intentionally disordered GaAlAs-GaAs superlattices. *Journal of Applied Physics*, **62**, 456-460.
- Börnstein L., 1999. Semiconductors II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds, *Springer Materials*, **41B**.
- Hayashi M. and Marcon R., 2000. High Resolution X-ray diffraction to characterize semiconductor materials. *Physica*, **1**, 21-27.
- Horikoshi Y., Kawashima M. and Yamaguchi H., 1986. Low-temperature growth of GaAs and AlAs-GaAs quantum-well layers by modified molecular beam epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, **25**, L868-L870.
- Kato T., Susawa H., Hirotani M., Saka T., Ohashi Y., Shichi E. and Shibata S., 1991. GaAs/GaAlAs surface emitting IR LED with Bragg reflector grown by MOCVD. *Journal of Crystal Growth*, **107**, 832-835.
- Kish F. A., Caracci S. J., N. H. Jr., Dallesasse J. M., Höfler G. E., Burnham R. D. and Smith S. C., 1991. Low-threshold disorder-defined native-oxide delineated buried-heterostructure Al_xGa_{1-x}As-GaAs quantum well lasers. *Applied Physics Letters*, **58**, 1765-1767.
- Liu C. Y., Yuan S., Dong J. R. and Chua S. J., 2004. Temperature dependence of photoluminescence intensity from AlGaInP/GaInP multi-quantum well laser structures. *Journal of Crystal Growth*, **268**, 426-431.
- Liu X. Q., Fetzer C. M., Rehder E., Cotal H., Mesropian S., Law D. and King R. R., 2012. Organometallic vapor phase epitaxy growth of upright metamorphic multijunction solar cells. *Journal of Crystal Growth*, **352**, 186-189.
- Neamen D. A., 2003. Semiconductor Physics and Devices, **4**, Avenue of the Americas, 17-19.
- Pahuja O. P. Dr., 2005. Solid State Physics, **1**, SP/Laxmi Publications, New Delhi, 45-47.
- Quinn J. J. and Yi K.-S., 2009. Solid State Physics Principles and Modern Applications, **2009**. Springer, 3-36.
- Schubert E. F., 2006. Light-Emitting Diodes, **2**. Cambridge University Press, Edingburgh Building, 86-100.
- Thompson A. G., 1997. MOCVD technology for semiconductors. *Materials Letters*, **30**, 255-263.

Removal of Heavy Metal Ions with Phenoxy Substituted Cyclotriphosphazene Derivatives Bearing Imine

Tahsin ÖZER^{1*}, Tuba ERDOĞAN², Ali İhsan ÖZTÜRK³

¹Osmaniye Korkut Ata University Bahçe Vocational School, Bahçe, Osmaniye, Turkey.

²Harran University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Chemistry, Şanlıurfa, Turkey.

³Osmaniye Korkut Ata University Faculty of Arts and Sciences, Chemistry Osmaniye, Turkey.

*Corresponding author e-mail: tahsinozer@osmaniye.edu.tr ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0344-7118

tubaerdogan79@hotmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-4944-7930

aliihsanozturk@osmaniye.edu.tr ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-3912-0670

Geliş Tarihi: 22.03.2020

Kabul Tarihi: 10.08.2020

Abstract

Keywords
Phosphazene;
Cyclotriphosphazenes;
Organophosphazenes;
Imine;
Adsorption.

Hexa [4-(4-hydroxy-phenyliminomethyl) phenoxy] cyclotriphosphazene (**A1**) and Hexa [4-(2-hydroxy-phenyliminomethyl) phenoxy] cyclotriphosphazene (**A2**) were derived from the reactions of hexa(4-formyl-phenoxy)cyclotriphosphazene and hexa(2-formyl-phenoxy)cyclotriphosphazene with 4-aminophenol and 2-aminophenol. Adsorption process in an aqueous solution of Cu, Fe, Mn and Zn ions of the organophosphazenes bearing imine groups were performed depending on the initial concentration of metal ions and time. All of the compounds adsorbed the selected metal ions in the first 10 minutes. When the initial concentration of metal ions increases, the amount of metal ions adsorbed of organophosphazene with imine groups increased. Although the chemical structures of the compounds are different, the amount of adsorbed metal was about the same.

İmin Grupları Taşıyan Fenoksi Sübstitüe Siklotrifosfazen Türevleri ile Ağır Metal İyonları Giderimi

Öz

Anahtar kelimeler
Fosfazan;
Siklotrifosfazen;
Organofosfazene;
İmin; Adsorption.

Hekza[4-{{(4-hidroksi-fenilimino)metil}fenoksi}siklotrifosfazenin(**A1**) ve hekza[4-{{(2-hidroksi-fenilimino)metil}fenoksi}siklotrifosfazenin(**A2**), 4-aminofenol ve 2-aminofenol ile hekza (4-formil-fenoksi) siklotrifosfazen ve hekza (2-formil-fenoksi) siklotrifosfazen reaksiyonlarından türetilmiştir. İmin gruplarını taşıyan organofosfazelerin sulu Cu, Fe, Mn ve Zn iyonları çözeltisinde adsorpsiyon işlemi, metal iyonlarının başlangıç konsantrasyonuna ve süresine bağlı olarak gerçekleştirildi. Bileşiklerin tümü seçilen metal iyonlarını ilk 10 dakika içerisinde adsorbe etti. Metal iyonlarının başlangıç konsantrasyonu arttığında, imin gruplarıyla organofosfazene adsorbe edilen metal iyonlarının miktarı arttı. Bileşiklerin kimyasal yapıları farklı olmasına rağmen, adsorbe edilen metal miktarı yaklaşık olarak aynıydı.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduce

Phosphazenes are involved in inorganic and organic chemistry. Phosphazenes are compounds of the structure R₃P=N-R (R, halogen, alkoxy, amino, alkyl and aryl) of the same group (VA) nitrogen and phosphorus atoms (Allcock, 1972). There are three different groups of phosphazene compounds, linear (1), ring (2) and poly (3). (Figure 1.). In the linear phosphazenes, three side groups are bound to three phosphorus atoms, while in the ring and poly

phosphazenes, two side groups are bound to each phosphorus atom. These side groups can be halogens, a wide variety of organic or organometallic compounds (Allen, 1994).

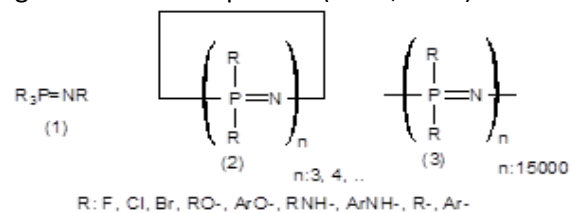


Figure 1. Structure of phosphazene compound groups.

Organophosphazenes are synthesized from the reactions of halophosphazenes and organic nucleophiles. It is estimated that over 10,000 different ring and linear organophosphazenes have been synthesized to date. Among these organophosphazenes, the number of organophosphazenes that carry groups such as

formyl, imine and oxime is quite low. New organophosphazene derivatives of formyl and imine, which are our study subjects, were performed at room temperature and room atmosphere.

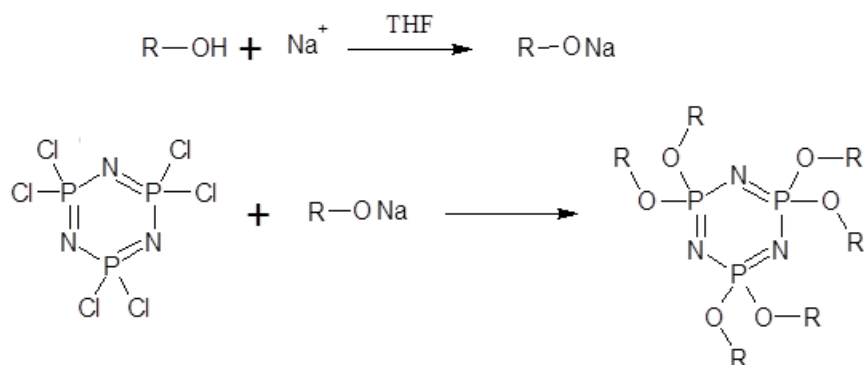


Figure 2. Reaction of halophosphazene with sodium phenolates

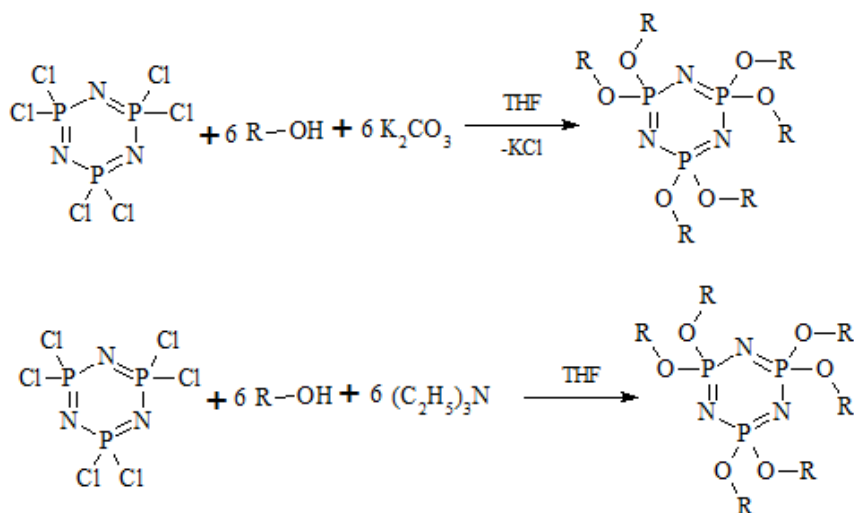


Figure 3. Synthesis of organophosphazene from the reaction of halophosphazene with phenol in the presence of base

1.1 Reaction Mechanism of Halophosphazenes with Phenols

The reaction of halophosphazenes and phenols is carried out in one of two methods. In the first method, the salt of the phenol with metallic sodium is first prepared and then reacted with halophosphazene. This reaction results in organophosphazene and NaCl. The phenolate acts as nucleophilic in the displacement.

In the second method, the reaction of halo phosphazene with phenol takes place in the presence of one of the bases such as carbonates of

group 1A or triethylamine. The base used is said to serve to retain the HCl formed in the reaction. This method is simpler than the first method. Because in the first method must to prepare the salt of phenol. Since the phenol salts have the ability to decompose by air, the reaction should be carried out in an airless environment.

1.2 Reactions of Halo Phosphazenes with Formyl-bearing Phenols

Formyl-bearing organophosphazenes are derived from the reactions of hexa chloro cyclo triphosphazene with 4- hydroxybenzaldehyde, 2-

hydroxybenzaldehyde, sodium 4-formyl-3-methoxyphenate, 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde, 2-hydroxy-4-methoxybenzaldehyde, 5-bromo-2-formylbenzaldehyde and 5-chloro-2-formylbenzaldehyde. Both methods were used in these studies. All of the studies were carried out in an airless environment. Both methods were used in these studies. But second method was more used. All of these reactions were carried out in an airless environment.

Carriedo et al. (1996) obtained hexa(4-formylphenoxy) cyclotriphosphazene in the THF solvent of 4-

hydroxybenzaldehyde and in the presence of K_2CO_3 in the presence of 91% of the hot reaction with hexachlorobenzoyl triphosphazene (Figure 4). In this reaction, 6 moles of 4-hydroxybenzaldehyde $N_3P_3Cl_6$, 14.4 moles of K_2CO_3 $N_3P_3Cl_6$ were used (Cariedo et al., 1996). They obtained the same compound at room temperature and 92% yield, using 6.07 moles of 4-hydroxybenzaldehyde $N_3P_3Cl_6$ and 12.16 moles of K_2CO_3 $N_3P_3Cl_6$ (Cil et al., 2006). In both studies, the reaction was continued for 48 hours in the absence of air.

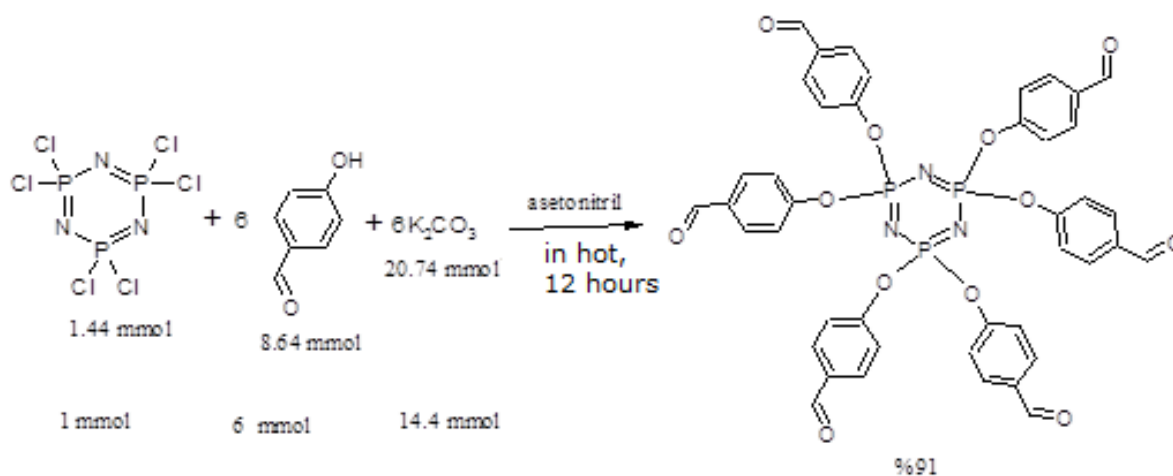


Figure 4 Synthesis reaction of hexa(4-formylphenoxy) cyclotriphosphazene.

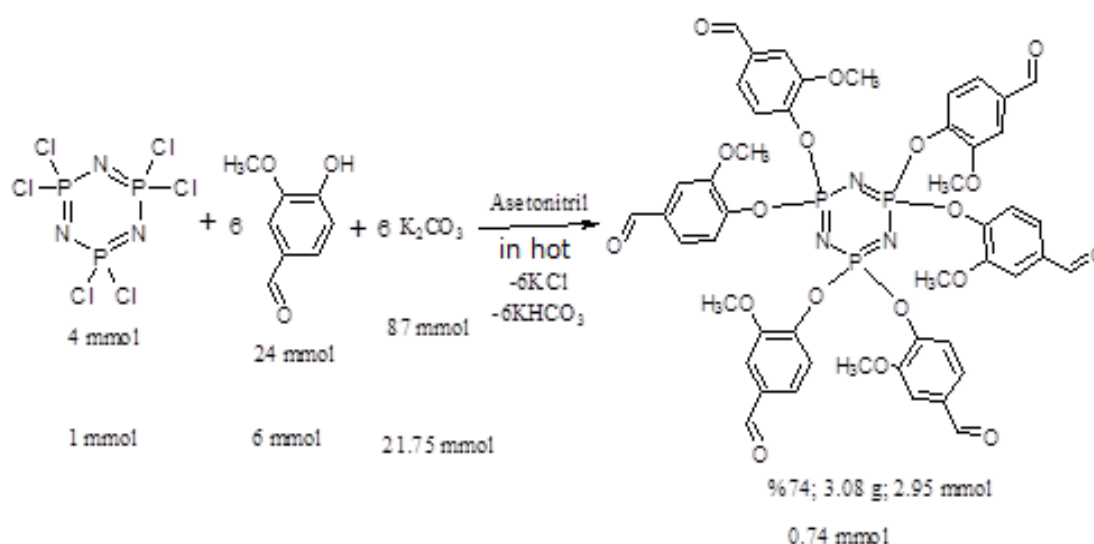


Figure 5. Synthesis of hexa(4-formyl-2-methoxyphenoxy) cyclotriphosphazene.

Tümer et al (2008) in the presence of K_2CO_3 in the acetonitrile solvent of 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde with hexachlorocyclotriphosphazene, they obtained hexa

(4-formyl-2-methoxyphenoxy) cyclotriphosphazene in a 74% yield from in the hot reaction at 48 hours (Tümer et al., 2008). In this reaction, 6 moles of 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde $N_3P_3Cl_6$, 21.75

moles of K_2CO_3 $N_3P_3Cl_6$ were used. The reaction was carried out in airless medium (Figure 5).

Yuan et al (2005) obtained hexa (4-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene compound in 88% yield from the

reaction of hexaklorosiklotrifosfazene with sodium 4-formylphenol in THF at 48 hours in hot (Yuan et al., 2005). This reaction was carried out in the airless medium (Figure 6).

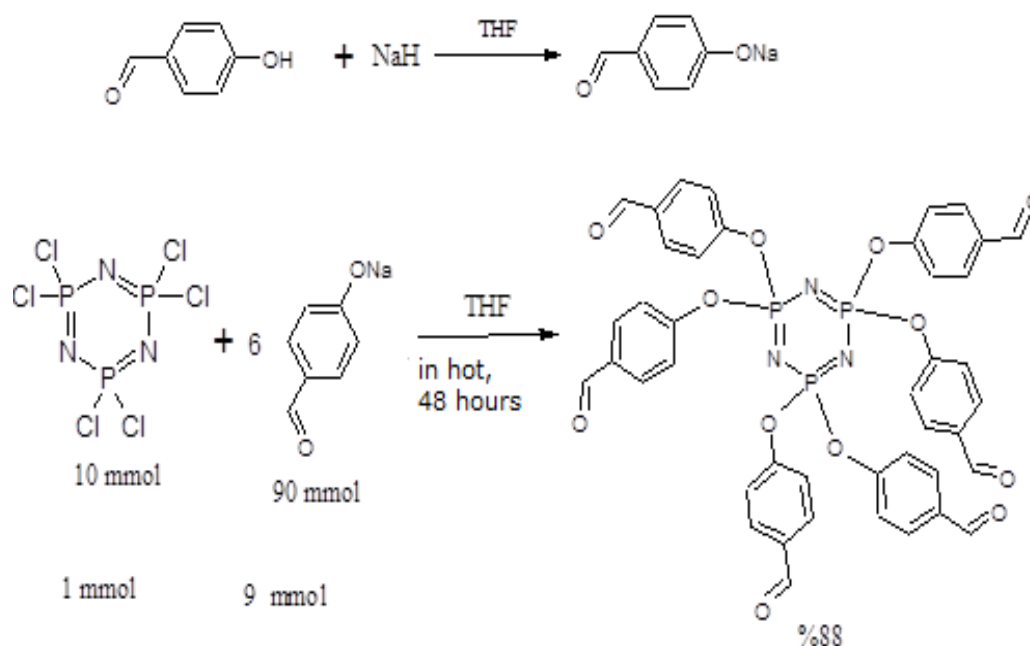


Figure 6. Synthesis of hexa (4-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene from sodium 4-formyl-phenol.

1.3 Imine Bearing Organophosphazenes

The imines are derived from the acid-catalyzed reaction of amines with aldehydes and ketones. Such compounds were first introduced by Schiff, It is also called Schiff base. Imine compounds derived from aromatic aldehyde and aromatic amines are more stable.

Few studies have been done on the synthesis of imine-bearing organophosphazenes from the reactions of formyl-bearing organophosphazene with primary amines. In studies, hexa (4-formylphenoxy) cyclotriphosphazene, hexa (2-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene, hexa (4-bromo-2-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene, hexa (4-chloro-2-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene, hexa (4-amino-3-methyl-phenoxy) cyclotriphosphazene, 1- {2- [1,3-di (oxytetrahydroxy) -3,5,5-tri (2-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene] oxyethylamino} anthraquinone and 1,3-oxytetraethoxy) -1,3,5,5-tetra (2-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene as formyl bearing organophosphazene used (Aslan et al., 2008, Ozturk et al., 2013).

1.4 Adsorption and Adsorption Types

The adherence of atoms, ions or molecules on a solid surface is called adsorption. The separation of the suspended particles from the surface is called desorption. The rate and amount of adsorption is a function of the adsorbing surface. For this, substances which surface area according to the mass is larger, preferred. If the pressure increases during the adsorption of gases, the adsorbent may adsorb more of the substance. The same applies to adsorption of solutions. Adsorption of the solution; temperature depends on the nature of the substance to be adsorbed and the concentration in the solution (Karaman, 2010).

The adsorption of gases and liquids (in solution) has three successive velocity steps. The first is the transport of adsorbed material to the outer surface of the adsorbent as a film (film diffusion), the second is the diffusion within the adsorptive pores (Pore diffusion). In the last step, adsorption of adsorbent material onto the adsorbing pore surface occurs. Usually the last step is very fast. In the adsorption of liquids, adsorption is caused by the interest of the solid matter against the solute. This

surface phenomenon is due to the electrical attraction of the solvent applied to the adsorbent, the Van der Waals forces or the chemical structure.

1.5 Adsorption Types

There are three different types of adsorption depending on the type of attraction forces between adsorbed molecules and adsorbing surface.

1. Physical adsorption: Physical adsorption occurs as a result of physical attraction forces between the solid surface and the adsorbed substance molecules. Physical adsorption; the forces that bind adsorbed molecules to the adsorbing surface are weak Van der Waals forces. Desorption is easier and faster because the attraction forces are weak. Physical adsorption is generally observed at low temperature. It is characterized by low energy adsorption. Physical adsorption is reversible, and the process is very fast. As the temperature increases, physical adsorption is generally reduced (Berkem and Baykut, 1984).

2. Chemical adsorption: Chemical adsorption is caused by the chemical bond between adsorbing molecules and adsorbing surface molecules or atoms. This type of adsorption in the chemical interaction is more difficult for desorption. Chemically adsorbed molecules cannot move freely at the interface. The bond which between the adsorbing and adsorbed, is strengthened by the increase in temperature as in chemical reactions.

3. Ionic adsorption: The effect of electrostatic gravitational forces between adsorbed and adsorbent is the attachment of ions on the surface. It is important that the adsorbing and adsorbed materials have opposite electric charges and that the surfaces attract each other. Electric charge and small diameter ions are better adsorbed.

It is difficult to explain the adsorption process by one of the types of adsorption outlined above. In many cases, physical and chemical activation happens together. Some substances are physically absorbable at low temperatures and chemically at high temperatures. In the case of many adsorptions, different types of adsorption can be seen together or in succession (Berkem and Baykut, 1984).

1.6 Parameters Affecting Adsorption

Some of the important parameters affecting the adsorption process are summarized below (Karaman, 2010, Savcı, 2010).

Surface area: Adsorption is a surface event. It is therefore proportional to the specific surface area. The specific surface area is defined as the part of the total surface area suitable for adsorption. The size of the particle size of the adsorbent is small, the surface area is large and porous, and generally increases the adsorption. In addition, functional groups on the surface are also important factors affecting the adsorption behavior of the adsorbent.

Type and properties of adsorbing and adsorb material: Solubility of the solute in liquids is a controlling factor for the balance of adsorption. In general, there is an inverse relationship between the rate of adsorption of the solute and its solubility in the liquid phase. A water-soluble (hydrophilic) substance is less adsorbed than water-soluble (hydrophobic) material. Molecular size also affects adsorption. The molecule of the size most suitable for the pore size of the adsorbent is adsorbed better.

pH value of the medium: pH value of the solution in the event of adsorption is an important control parameter. Due to the strong adsorption of H⁺ and OH⁻ ions, the adsorption of other ions is affected by the pH of the solution. In general, the adsorption rate increases at pH where the substances are neutral. If there is too many hydrogen or hydroxyl ions in the environment, these ions enter the surface with the adsorption substance ions. This may result in less surface coating with adsorbed substance molecules, ie less adsorption.

Temperature: Adsorption reactions are generally exothermic, ie heat transfer reactions. Therefore, adsorption is generally increased as the temperature decreases. However, if the reaction is endothermic, ie, it is a reaction that takes heat from the environment, the adsorption will increase with increasing temperature. Small changes in temperature do not significantly affect the adsorption process.

1.7 Adsorbent Types and Properties

For the use of an adsorbent in industrial processes; It should be easy to find, be cheap, be reusable, do not enter into chemical reactions, have a large surface area per unit mass, adsorption capacity of adsorption to the desired liquids and gases, high selectivity against the substance to be required to show.

Various chemicals are used for adsorption techniques in water treatment. Silica gel, filler soil, pore size large resins, ion modifier resins with large pore sizes, active silica and activated carbon are the most well-known adsorbents.

Silica gel is a granular and porous form of silicon dioxide synthetically produced from sodium silicate, water and glass content. It is used in dehydration of air and other gases, fractionation of hydrocarbons. Molecular sieves; porous, synthetic zeolite crystals are silver alumina silicates. They are uniform porous and different from other adsorbents. Different zeolites have 3-10 Å pore size.

Fuller soil (magnesium aluminum silicate); petroleum fractions, vegetable and animal oils are used in the purification. A porous structure is formed by heating and drying the clay.

Activated clays; bentonite and other clays. They do not have adsorptive properties when they are not activated with acid (H_2SO_4 or HCl). After activation with H_2SO_4 or HCl, the mixture is washed and dried. It is used in particular color removal of petroleum products by gaining a fine powdered structure.

Molecular activated carbon; custom made. 5 - 5.5 Å (Å = 10⁻¹⁰ m) open pore structure. These pores can pass paraffin hydrocarbons but do not undergo large molecular diameter isoparaffins. Acetylene components are used to separate alcohols, organic acids, ketones, aldehydes. Synthetic polymeric adsorbents (resins); They are porous spherical particles with a diameter of 0.5 mm. Each particle is formed by a combination of microspheres of 10-4 mm diameter.

Bauxite (hydrated Al_2O_3); It is used in the filtration of oil fractions, especially in the dehydration of gases. The adsorption capacity is increased by increasing the temperature from 230 OC to 815 OC in the naturally occurring form of the hydrated

alumina. It is also used in color removal of petroleum products and drying gases.

Alumina; has a hard structure. Activated hydrated aluminum oxide is formed which by removed heating the moisture in its structure. The porous product is used in granular or powder form.

Bone charcoal; It is obtained from dried coal at 600 - 900 °C. It is used for the purification of sugar, to remove the ash from the solutions. Color relieving; It is used in the purification, purification of organic or inorganic substances, purification of sugar, vegetable and animal oils.

Gas adsorbent carbon; It is obtained by carbonization of coconut shells, fruit peels, coal, lignite and wood. It must be activated by hot oxidation with hot air or alum. It is used in granule or pellet form. The recovery of solvent vapors from gas mixtures is used to remove industrial odors, CO_2 and other industrial gases, gas masks and fractionation of hydrocarbons.

Zeolites are used in drying, separation of hydrocarbons and in many applications. Activated carbon; It is a microcrystalline material obtained by thermal decomposition of wood, fruit shells and coal. The average pore diameter, 10-60 Å surface area is 300 - 1200 m² / g. It is used in the adsorption of organic substances.

Organophosphazenes were synthesized by nucleophilic displacement reactions (SN1 or SN2) with organic groups because the phosphorous halogen linkage of halophosphazenes in which the halos (F, Cl, Br) are active in the side group. The reactions of phosphazenes with organic groups such as alcohols, phenols, amines (primary or secondary), thiols, organometallics, carboxylic acids and amides have been investigated. The most studied organic groups are alcohols, phenols and amines. The desired substituted phosphazene compounds could not be obtained in the reaction with carboxylic acids and amides.

Those polyphosphazenes; There are a wide range of applications such as medicine, microlithography, construction of materials that delay or prevent burning. Because polyphosphazenes; solid fibers, films, glasses and elastomers commonly used in the state-of-the-art technology, can serve as solid electrodes and electronic conductors, as carriers of

immobilization of macromolecular biomedical agents, chemotherapeutic agents, enzymes or transition metal catalysts. Wide application areas lead to a focus on polyphosphonases (Allcock, 1987).

In this study, the adsorption of **A1** and **A2** compounds derived from hexa (4-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene and hexa (2-formylphenoxy) cyclotriphosphazene and 4-aminophenol and 2-aminophenol in some heavy metal-containing aqueous solutions were investigated. The results of the analysis revealed that imine - bearing organophosphazenes adsorb heavy metals. The heavy metal (Cu, Fe, Mn and Zn) adsorption property of these newly synthesized compounds was made for the first time with this study. These atoms were preferred because heavy metals such as copper, iron, manganese, zinc play very important roles in cell functions.

2. Material and Method

2.1 Used Solvents and Chemical Substances

THF, acetonitrile, ethyl alcohol, dichloromethane, acetone and diethyl ether solvents were used in the synthesis and purification of the compounds. All reactions were carried out at ambient temperature and ambient atmosphere.

A1 and **A2** compounds were synthesized by the method described in the literature (Aslan et al., 2010, Aslan et al., 2017). The structure of the compounds is given in Figure 7. The characteristic data, IR and NMR of the compounds were given by Aslan et al. (2017) Data of the compounds **A1** and **A2** were given in Table 1.

Table 1. Photophysical and Stoke's Shift data of the compounds **A1** and **A2** (Aslan et al., 2017).

Comp.	A1	A2
Cons. (mol/L)	2.37×10^{-5}	2.37×10^{-5}
Absorption, λ_{max} , nm (log ϵ)	242 (4.9), 269 (4.7), 285 (4.7), 329 (4.7)	241 (4.8), 265 (5.0), 288 (5.0), 352 (5.0)
Excitation, λ_{Ex} , nm (log ϵ)	309(7.3)	308(7.5)
Emission, λ_{Em} , nm (log ϵ)	745(7.4)	407(7.6)
Stoke's shift $\Delta\lambda_{ST}$ (nm)	436	99

The FT-IR spectra of the **A1** and **A2** exhibit characteristic strong bands in the range of 1220-1150 cm^{-1} and 980-940 cm^{-1} . As shown in figure 7, strong peak in IR spectra of **A1** and **A2** compounds observed in 1703 and 1695 cm^{-1} .

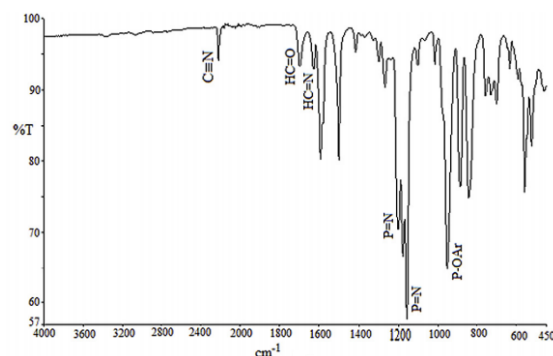


Figure 7. FTIR spectra of the compounds **A1** and **A2** (Aslan et al., 2017).

The ^1H and ^{31}P NMR data of the **A1** and **A2** compounds were given in figure 8, 9, respectively.

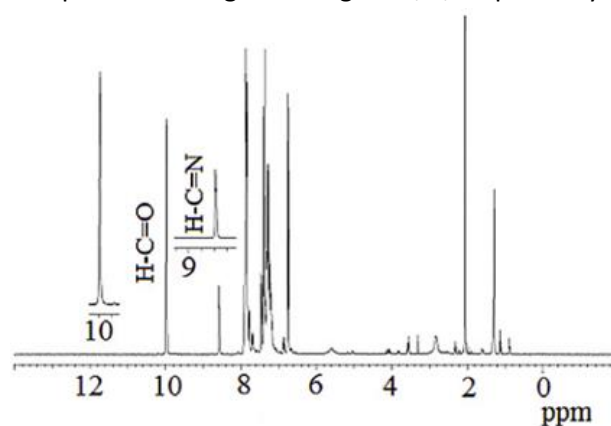


Figure 8. ^1H NMR spectra of the compounds **A1** and **A2** (Aslan et al., 2017).

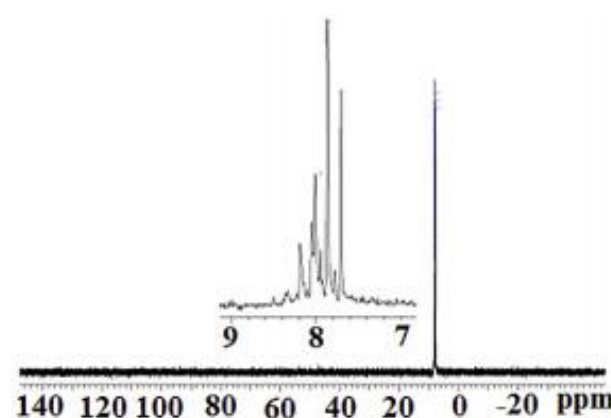


Figure 9. ^{31}P NMR spectra of the compounds **A1** and **A2** (Aslan et al., 2017).

Mn, Fe, Cu and Zn ions were obtained from the solutions of the salts in water. Compound **A1** was

prepared according to the general procedure (0.760 g, 6.960 mmol) as indicated by Aslan et al. (2017). Yield: 0.80 g (97%): mp:185 OC. FTIR (cm^{-1}): 3414 (O-H), 1623 (HC=N), 1205, 1178, 1159 (P=N), 959 (P-O-Aryl). ^1H NMR δ (ppm, CDCl_3): 8.55 (H-C=N), 7.80-6.50 (Aryl H). ^{31}P NMR δ (ppm): 9.14. Compound **A2** was prepared according to the general procedure (0.760 g, 6.960 mmol) as indicated by Aslan et al. (2017). Yield: 0.64 g (78%): mp:154 OC. FTIR (cm^{-1}): 3414 (O-H), 1625 (HC=N), 1202, 1177 and 1158 (P=N), 955 (P-O-Aryl). ^1H NMR δ (ppm, CDCl_3): 8.77 (H-C=N), 8.00-6.80 (Aryl H). ^{31}P NMR δ (ppm): 8.66 (Aslan et al., 2017).

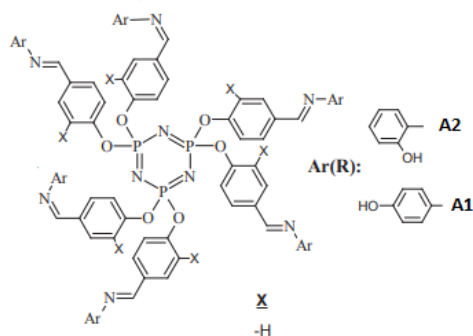


Figure 10. Structure and synthetic route (Aslan et al., 2017).

2.2 Method

2.2.1 Time-Dependent Adsorption Procedures

In 25 mg Adsorbant 1,2,3 and 4 batch reactors, solutions containing 100 mg / L concentration and 50 mL volume of Zn, Fe, Mn and Cu were added and subjected to adsorption test. Adsorption processes were carried out on the 5th, 10th, 15th, 30th, 60th, 90th, 120th, 180th and 240th minutes to observe the time-dependent adsorption efficiency and evaluate the results on various kinetic models. Filtration was then performed. The concentration of ions in the filtrate was determined by AAS. The values obtained were given in the following tables.

Table 2. Adsorption results of metal ions by time of compound **A1**

time, minute	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm
5	24.720	22.685	25.805	38.700
10	10.034	9.278	10.350	18.268

15	5.057	4.782	5.149	5.964
30	5.148	4.843	5.190	5.890
60	5.139	4.967	5.208	5.851
90	5.188	4.641	5.245	6.302
120	5.175	4.800	5.250	6.007
180	5.101	4.721	5.259	8.775
240	5.027	4.695	5.299	5.940

Table 3. Adsorption results of metal ions by time of compound **A2**

time, minute	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm
5	23.960	25.150	26.845	32.210
10	10.374	9.842	10.776	11.742
15	5.113	4.832	5.180	5.580
30	5.214	4.956	5.355	5.809
60	5.218	4.979	5.407	5.824
90	5.066	4.717	5.236	5.604
120	5.215	4.831	5.321	5.735
180	5.134	4.894	5.371	5.981
240	5.099	4.764	5.334	5.690

2.2.2 Adsorption Procedures at Different Concentrations of Ions

25 mg Adsorbent was mixed with heavy metal solvents at concentrations of 50, 100, 200, 300, 400 and 500 mg / L. The results are given in the second table. Filtration was carried out at the end of the adsorption time. The concentration of ions in the filtrate was determined by AAS. The results are given in the tables below.

Table 4. Adsorption results of the compound **A1** with respect to the concentration of metal ions

ppm	Cu	Fe	Mn	Zn
50	33.273	35.267	34.867	36.133
100	64.400	65.867	63.533	68.500
200	94.900	131.100	123.500	134.733
300	124.467	164.733	161.100	177.700
400	187.967	248.500	238.800	263.767
500	226.100	307.700	292.700	334.333

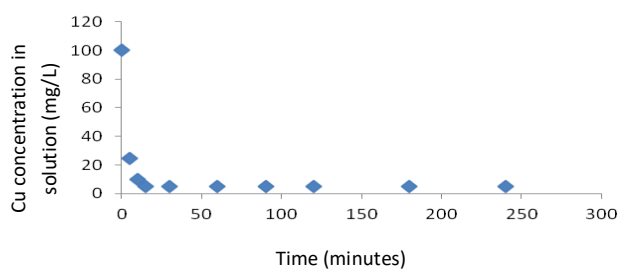
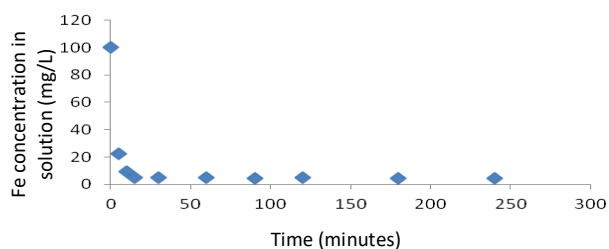
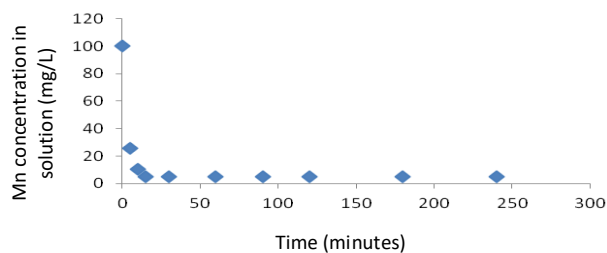
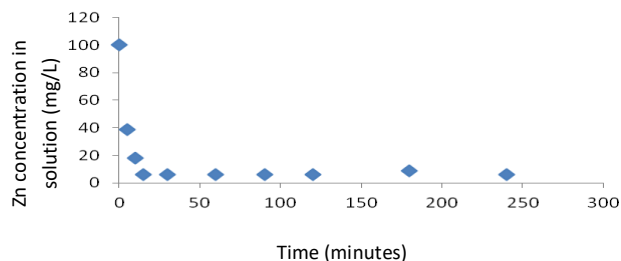
Table 5. Adsorption results of the compound **A2** with respect to the concentration of metal ions

ppm	Cu	Fe	Mn	Zn
50	39.033	43.967	41.967	45.133
100	58.700	64.467	62.567	66.267
200	88.667	117.700	115.567	128.500
300	129.167	174.967	169.500	196.000
400	182.067	251.700	239.933	281.000
500	212.467	290.833	276.600	318.067

3. Results and Discussion

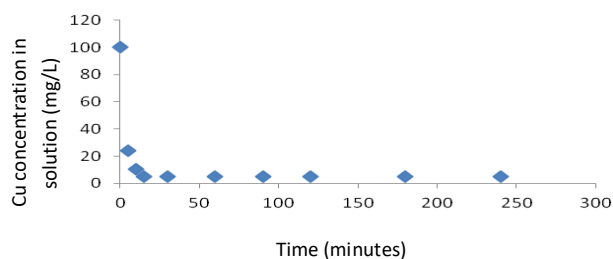
3.1 Evaluation of adsorption results of the compound A1

In the 50 mL aqueous solution of 100 mg / L containing 25 mg Cu, Fe, Mn and Zn ions of the compound **A1**, were activated in the 5th, 10th, 15th, 30th, 60th, 90th, 120th, 180th, and 240-minute periods. At the end of these periods, the concentration of ions in the solution was determined. **A1** adsorbed all selected ions and adsorption was completed in 10 minutes. After a period of 10 minutes, the concentration of ions remained constant. The graphs of the obtained values of the tests were given in the following figures.

**Figure 11.** Variation of the concentration of Cu ions in which the compound of A1 is not adsorbed over time.**Figure 12.** Variation of the concentration of Fe ions in which the compound of A1 is not adsorbed over time.**Figure 13.** Variation of the concentration of Mn ions in which the compound of A1 is not adsorbed over time.**Figure 14.** Variation of the concentration of Zn ions in which the compound of A1 is not adsorbed over time.

3.2 Evaluation of adsorption results of the compound A2

In a 50 mL aqueous solution of 100 mg / L containing 25 mg of Cu, Fe, Mn and Zn ions of the compound **A2** was activated at 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 180, and 240 minutes. At the end of these periods, the concentration of ions in the solution was determined. **A2** adsorbed all selected ions and adsorption was completed in 10 minutes. After a period of 10 minutes, the concentration of ions remained constant. The graphs of the obtained values of the tests were given in the following figures.

**Figure 15.** Variation of the concentration of Cu ions in which the A2 compound is not adsorbed over time.

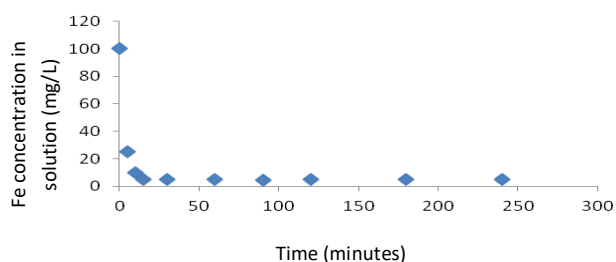


Figure 16. Variation of the concentration of Fe ions in which the A2 compound is not adsorbed over time.

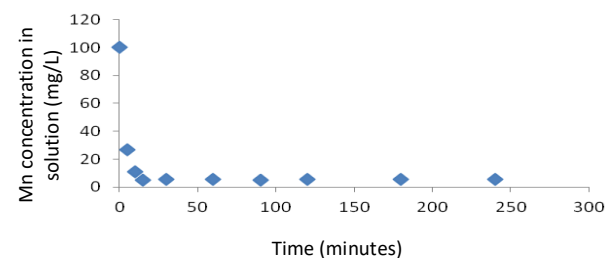


Figure 17. Variation of the concentration of Mn ions in which the A2 compound is not adsorbed over time.

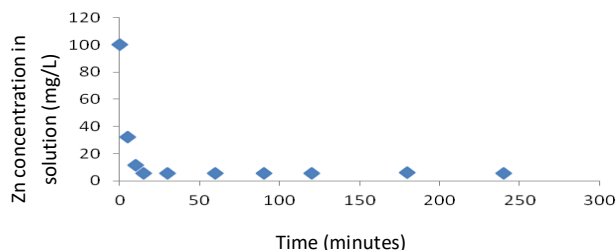


Figure 18. Variation of the concentration of Zn ions in which the A2 compound is not adsorbed over time.

4. Conclusions

Compounds Hexa [4-(4-hydroxy-phenyliminomethyl) phenoxy] cyclotriphosphazene (**A1**) and Hexa [4-(2-hydroxy-phenyliminomethyl) phenoxy] cyclotriphosphazene (**A2**) which are the imine-bearing organocyclotriphosphazenes which we use as adsorbents, were derived from hexa (4-formylphenoxy) cyclotriphosphazene and hexa (2-formyl-phenoxy) cyclotriphosphazene 4-aminophenol and 2-aminophenol. The chemical structure of these compounds is different from each other. Adsorption is available for all metal ions.

Adsorption of metal ions of the compounds was examined according to the time and beginning concentration of metal ions. The selected times are 5, 10, 15, 30, 50, 90, 120, 180 and 240 minutes. The

initial concentrations of metal ions are 50, 100, 200, 300, 400 and 500 ppm. Adsorbents 25 mg were used in both studies. The analyzes belong to the metal ions remaining in the solution after adsorption.

All compounds adsorbed metal ions which they could adsorb in the first 10 minutes. After this time it was understood that the adsorption did not take place because the concentration of the metal ions was constant. The least metal ion absorbed by all compounds is Zn.

When the initial concentration of metal ions is different the amount of metal adsorbed by the compounds was also different. As the initial concentration of the metal ion increases, the proportion of the amount of metal adsorbed by the compounds increased. Although the amount of compounds is the same in all, the amount of adsorption increases. The amount of metal adsorbed then depends on the initial concentration of the metal.

It was understood that these compounds could be used to remove metal ions.

Acknowledgement

This study was supported by HÜBAK (Project No: 12102). We thank HÜBAK.

References

- Allcock, H. R., Desorcie, J. L., Riding, G. H., 1987. The organometallic Chemistry of Phosphazenes. *Polyhedron*, **2**, 119-157.
- Allcock, H. R., 1972. Phosphorus-Nitrogen Compounds, Academic Press, London.
- Allen, C. W., 1994. Linear cyclic and polymeric phosphazenes. *Coord. Chem. Rev.*, **130**, 137-173.
- Aslan, F., Demirpence, Z., Tatsiz, R., Turkmen, H., Ozturk, A.I., Arslan, M., 2008. The Synthesis, Characterization and Photophysical Properties of Some New Cyclotriphosphazene Derivatives Bearing Schiff Base. *Z Anorg Allg Chem.*, **634**, 1140-1144.
- Aslan, F., Öztürk, A.İ., Söylemez, B., 2017. Synthesis of fluorescence organocyclotriphosphazene derivatives having functional groups such as formyl, Schiff base

- and both formyl and Schiff base without using Ar or N₂ atmosphere. *J. M. Str.*, **1137**, 387e395.
- Aslan, F., Ozturk, A. I., Arslan, M., 2003. The Reaction of N- dichlorophosphoryl-P-trichlorophosphazene with alkyl grignard Reagents. *Het. Chem.*, **14**, 138-143.
- Aslan, F., Öztürk, A.İ., Ökkeş, Y., Arslan, M., Mutlu, İ.H., 2010. Karbonil taşıyan fenoksi süstitüe siklotrifosfazenden yeni schiff bazı türevlerinin sentezi, karakterizasyonu, biyolojik aktiviteleri, iletkenlik ve floresans özelliklerinin incelenmesi, 107T407 nolu TÜBİTAK projesi.
- Berkem, A. R., Baykut, S., 1984. Fizikokimya. Fatih Yayınevi Matbaası, İstanbul (in Turkish).
- Carriedo, G.A., Catuxo, L.F., Alonso, F.J.G., Elipe, P.G., Gonzalez, P.A., Sanchez, G., 1996. On the Synthesis of Functionalized Cyclic and Polymeric Aryloxyphosphazenes From Phenols. *Appl. Polym. Sci.*, **59**, 1879-1885.
- Cil, E., Arslan, M., Görgülü, A.O., 2006. Synthesis and Characterization of Benzyl and Benzoyl Substituted Oxime-Phosphazene. *Polyhedron*, **25**, 3526-3532.
- Karaman, İ, 2010. Physical activation of soma lignite and adsorption of dyestuff on activated product. Master Thesis, Ankara University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Chemical Engineering, Ankara (in Turkish), 134.
- Ozturk, A. I., Aslan, F., Cil, E.; Arslan, M., Kilic, A., 2003. The Synthesis And Characterization of Cycloalkoxy-Linear Phosphazenes. *Phos., S. and Si.*, **178**, 2097–2105.
- Öztürk, A. İ., Aslan, F., Yılmaz, Ö., Alğın M., Arslan, M., Mutlu, H. İ., 2013. Synthesis, Characterization, and Spectroscopic Properties of Hexa(4-Bromo-2-Formyl-Phenoxy)Cyclotriphosphazene and Hexa(4-Chloro-2-Formyl-Phenoxy)Cyclotriphosphazene and Fully Substituted Cyclotriphosphazene Derivatives Bearing a Schiff Base at Room Temperature. *Phos., S., and Si. and the Rel.E.*, **188**, 585-595.
- Savci, S., 2010. Investigation of the adsorption of some veterinary and human pharmaceuticals by live activated sludge. PhD thesis, Çukurova university institute of natural and applied sciences department of environmental engineering, Adana (in Turkish), 224.
- Tümer, Y., Bati, H., Çalışkan, N., Yüksektepe, Ç., Büyükgüngör, O., 2008. Synthesis, Crystal Structure and Characterization of Hexakis[2- metoxy-4-formylphenoxy]cyclotriphosphazene. *Z. Anorg Allg Chem.*, **634**, 597-599.
- Yuan, W., Zhu, L., Huang, X., Zheng, S., Tang, X., 2005. Synthesis. Characterization and Degradation of Hexa-armed Star-Shaped Poly (L-lactide)s and Poly (D, L-Lactide)s Initiated with Hydroxyl -terminated Cyclotriphosphazene. *Pol. Deg. and Sta.*, **87**, 503-509.

Araştırma Makalesi / Research Article

Synthesis and Characterization of a New Nickel(II) Compound Derived from $[BW_{12}O_{40}]^{3-}$ and 2,2'-BipyridylMükerrem FINDIK^{1*}, Asuman UÇAR², Nuriye KOÇAK³, Onur ŞAHİN⁴, Alper Tolga ÇOLAK⁵¹Necmettin Erbakan University, A.K. Education Faculty, Department of Chemistry Education, Research Laboratory, Konya, Turkey.²Agri Ibrahim Cecen University, Education Faculty, Department of Science Education, Agri, Turkey.³Necmettin Erbakan University, A.K. Education Faculty, Department of Science Education, Konya, Turkey.⁴Sinop University, Department of Scientific and Technological Research Application and Research Center, Sinop, Turkey.⁵Dumlupınar University, Faculty of Arts and Science, Department of Chemistry, Kutahya, Turkey.* Sorumlu yazar e-posta: mmukerrem@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9441-0814>e-posta: asucar340@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-3120>e-posta: nuriye42@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0531-3538>e-posta: onurs@sinop.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3765-3235>e-posta: atahan2005@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4478-7792>

Geliş Tarihi: 01.07.2020

Kabul Tarihi: 31.08.2020

Abstract**Keywords**
Keggin-type;
Polyoxometalate;
Crystal structure; 2,2'-
bipyridyl

A Keggin-type polyoxometalate $\{Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)[BW_{12}O_{40}]\}^{3-}$ (NiBWO) has been hydrothermally synthesized in the high temperature resistant glass bottle for the first time. The structure has been characterized by elemental analyses, X-ray diffraction, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Thermogravimetric Analysis, Scanning Electron Microscope and X-ray single crystal diffraction analyses. The X-ray single crystal study shows that the asymmetric unit of NiBWO is composed of one $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ anion, one $[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$ and one and a half of $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$ cations.

 $[BW_{12}O_{40}]^{3-}$ ve 2,2'-Bipiridil İçeren Yeni Bir Nikel(II) Kompleksinin Sentezi ve Karakterizasyonu**Öz****Anahtar Kelimeler**
Keggin-
tipPolioksometalat;
Kristal yapı; 2,2'-
bipiridil.

Keggin tipi bir polioksometalat olan $\{Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)[BW_{12}O_{40}]\}^{3-}$ (NiBWO) bileşiği yüksek ısıya dayanıklı cam şişede hidrotermal olarak ilk kez sentezlenmiştir. Bileşiğin yapısı elementel analiz, X-ışını kırınımı, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi, Termogravimetrik Analiz, Taramalı Elektron Mikroskobu ve X-ışını tek kristal kırınım analizleri ile karakterize edilmiştir. X-ışını tek kristal analiz sonucu, NiBWO bileşiğinin asimetrik biriminin bir $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ anyonu, bir $[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$ ve bir buçuk $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$ katyonlarından oluştuğunu göstermiştir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

The oxoanions containing multiple metal atoms are called polyoxometalates or POMs and have been known since the early 19th century. Berzelius synthesized the ammonium salt of $PMo_{12}O_{40}^{3-}$ anion, the first compound of the POM class, in 1826 (Berzelius 1826). From then on, researchers have synthesized POMs in new forms with different

metals. Hybrid inorganic-organic materials are synthesized for acquiring new materials with properties and bespoke structures. The most remarkable advantage of hybrid inorganic-organic materials are that they can combine dissimilar properties of inorganic and organic components in one material (Zhang et al. 2008, Kastner et al. 2017, Cameron et al. 2018). POM compounds becoming

hybrid compounds with the added metals and the organic ligand into their structure are employed in the surface science studies (Shakeri et al. 2019), the preparation of amphiphilic molecules (Zhao et al. 2019), the production of catalytic materials (Findik et al. 2019), the manufacture of medical supplies (Zong et al. 2018), and the continuous development are observed in the field of potential applications of these compounds.

It is well-known that transition-metal-substituted polyoxometalates are of great interest in the last decades owing to their controlled structures. The physical and chemical properties of different structures are applicable to diverse areas, such as magnetism, optics, catalysis, sensor, luminescence and materials science (Zheng et al. 2007, Zheng et al. 2012, Huang et al. 2014). Our aim in this study is to synthesize structures that serve as a new model for the design and formation of transition-metal-substituted POM architectures.

In this paper, we reported a new hybrid compound based on Keggin polyoxometalate. {Ni(2,2'-bipy)₂(H₂O)[BW₁₂O₄₀]}³⁻ (NiBWO) is composed of one [BW₁₂O₄₀]⁵⁻ anion, one [Ni(2,2'-bipy)₂(H₂O)]²⁺ and one and a half of [Ni(2,2'-bipy)₃]²⁺ cations: The structure of the synthesized compound was characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), elemental analyses, X-ray diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TGA), Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray single crystal diffraction analyses.

2. Materials and Methods

2.1. Chemicals

Nickel(II)chloride hexahydrate (NiCl₂.6H₂O) and hydrochloric acid (HCl) were supplied by Merck. Sodium tungstate dehydrate (Na₂WO₄.2H₂O), boric acid (H₃BO₃), 2,2'-bipyridyl (2,2'-bipy) and perchloric acid (HClO₄) were supplied by Sigma-Aldrich.

2.2. Apparatus

Perkin-Elmer 2400 CHN elemental analyzer was used for elemental analysis (C, N and H) of sample. For structural analysis of the sample was measured in the range of 4000 to 500 cm⁻¹ using Attenuated Total Reflection-Fourier Transformed Infrared (ATR-FTIR) spectrometer (Perkin Elmer 100). XRD using a

Bruker axis diffractometer (Bruker D8 ADVANCE) was used for the determination of the crystal structure of the NiBWO. The parameters of Bruker axis diffractometer was CuK α radiation, operating at 40 kV and 30 mA with a rate of 21°/min. Setaram thermal gravimetric analyzer was used for thermogravimetric analysis of the NiBWO over the temperature range of 25–1000 °C under a heating ramp of 10 °C min⁻¹ at N₂ atmosphere. SEM image was taken on a Hitachi – SU 1510 at accelerating voltage of 20 kV and magnification of 10.00 kX.

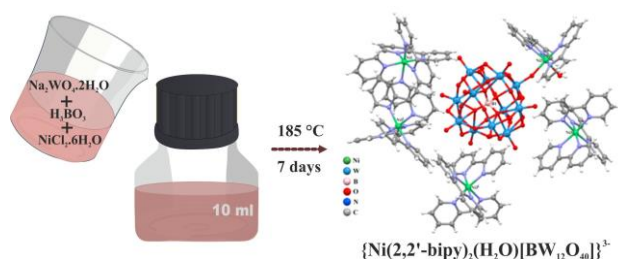
The hydrogen atoms bound to carbon atoms were treated as riding atoms with distances of 0.93 Å. Other H atoms were refined freely. In order to avoid ADP and NPD problems, the EADP command was used to refine the non-H atoms. With SHELXS-2013 (Sheldrick 2008), the structure of NiBWO was solved by direct methods and refined using full-matrix least-squares methods with SHELXL-2013 program (Sheldrick 2015) within WinGX (Farrugia 1999). The structural data of NiBWO was collected on Bruker APEX2 (Bruker 2013). MERCURY program was used for molecular graphics. Details of data collection and crystal structure determinations are shown in Table 1. Crystallographic data of the structure has been deposited in the Cambridge Crystallographic Data Center with CCDC number 1497303.

2.3. Procedure

In the synthesis of the new type of polyoxometalate, a new low cost method is used other than the traditional synthesis of polyoxometalates. In this method, instead of Teflon-lined autoclave, special production bottles and caps resistant to high temperatures are used. Schematic representation of the synthesis of NiBWO is given Scheme 1.

An aqueous solution of H₃BO₃ (1.5 mmol, 0.093 g), Na₂WO₄.2H₂O (3.00 mmol, 0.99 g), NiCl₂.6H₂O (0.825 mmol, 0.196 g) and 2,2'-bipy (0.75 mmol, 0.117 g) was stirred at room temperature for one hour. 6 M HCl was added to the mixture to adjusted the pH to 1.15, then the mixture transferred in a 10 mL bottle and allowed to react at 185 °C. After seven days, the product was slowly cooled down to room temperature at a rate of 10 °C/h, pink crystals were collected by filtration, washed several times with distilled water, and dried in air (yield 59%, based on

W). Elemental analysis (%): Calcd: $C_{130}H_{108}B_2N_{26}Ni_5O_{82}W_{24}$: C, 19.34; N, 4.51; H, 1.34; Found: C, 19.43; N, 4.57; H, 1.40. FT-IR (cm^{-1}): 3079, 1598, 1472, 1441, 1021, 948, 876, 754.



Scheme 1. Schematic representation of the synthesis of NiBWO.

3. Results and Discussion

3.1. Crystal structure

According to the result of X-ray single crystal study, the asymmetric unit of NiBWO has been proved to consist of one $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ anion, one $[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$ and one and a half of $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$. $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ anion with a Keggin-type structure has a structure with a central BO_4 [B-O bond distances range of 1.53(5)–1.56(6) Å] surrounded by the $W_{12}O_{36}$ group with tetrahedron coordination geometry. The presence of the two types of Ni(II) complexes $\{[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$ and $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}\}$ is the most striking feature of NiBWO (Figure 1). Each Ni(II) atoms of $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$ coordinated by six nitrogens from three 2,2'-bipy ligands [Ni-N bond lengths range of 2.02(4)–2.15(4) Å], showing a distorted octahedral geometry. The Ni2 atom is coordinated by four nitrogens from two 2,2'-bipy ligands [Ni-N bond lengths range of 2.01(4)–2.12(4) Å], one oxygen from a coordinated water molecule [Ni-O = 2.12(3) Å] and one oxygen from an anion $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ [Ni2-O40 = 2.03(3) Å], exhibiting a different distorted octahedral geometry. In other words, $[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$ should actually be described as $\{Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)[BW_{12}O_{40}]^{3-}\}$ (Figure 1). Selected bond lengths for NiBWO (Å) are shown in Table 2.

Table 1. Crystal data and structure refinement for NiBWO.

Empirical formula	$C_{130}H_{108}B_2N_{26}Ni_5O_{82}W_{24}$
Formula weight	8073.99
Crystal system	Monoclinic
Space group	C2/c
<i>a</i> (Å)	46.683 (6)
<i>b</i> (Å)	14.347 (2)
<i>c</i> (Å)	26.020 (4)
β (°)	90.001 (4)
<i>V</i> (Å ³)	17427 (4)
<i>Z</i>	4
Diffractometer	BRUKER D8-QUEST
Temperature (K)	296
θ range (°)	3.0–26.1
Measured refls.	103877
Independent refls.	17089
Parameters	271
<i>R</i> _{int}	0.176
<i>S</i>	1.13
<i>R1/wR2</i>	0.115/0.303

Table 2. Selected bond lengths for NiBWO (Å).

B1-O1	1.53(6)	N11-Ni3	2.09(3)
B1-O2	1.56(6)	B1-O3	1.55(5)
N3-Ni1	2.04(4)	N2-Ni1	2.05(4)
N6-Ni1	2.15(4)	N5-Ni1	2.03(4)
N7-Ni2	2.05(4)	O41-Ni2	2.12(3)
N10-Ni2	2.12(4)	N9-Ni2	2.01(4)

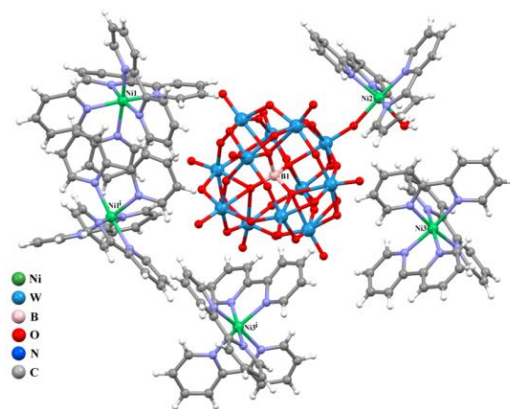
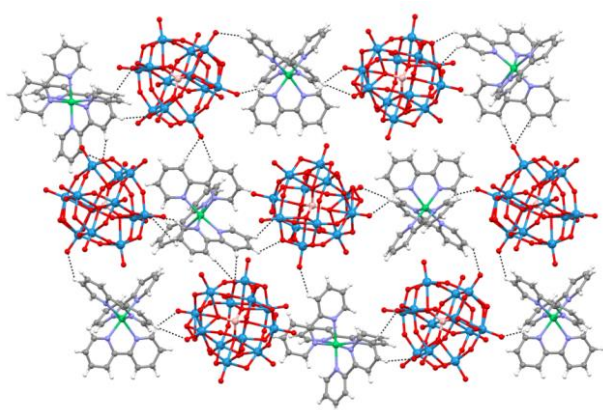
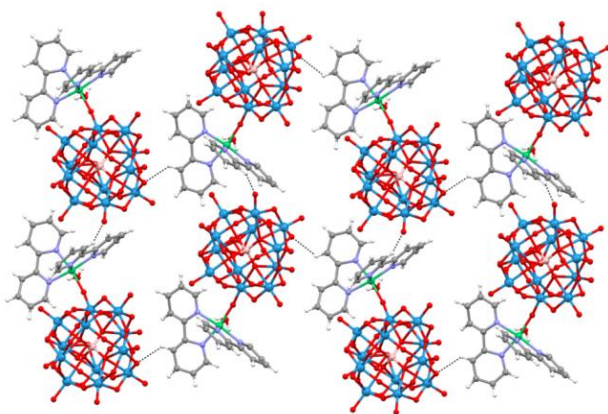


Figure 1. The molecular view of NiBWO [(i) $-x+1, y, -z+1/2$].

The complex has C–H \cdots O hydrogen bonds between POMs and $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$ (Table 3). Figure 2 shows POMs hydrogen bonds with three $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$ with C \cdots O lengths in the range of 3.03(3)–3.50(7) Å, respectively. Similarly, Figure 3 shows the POMs hydrogen bonds with $[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$, with C \cdots O lengths in the range of 3.00(8)–3.40(6) Å, respectively.

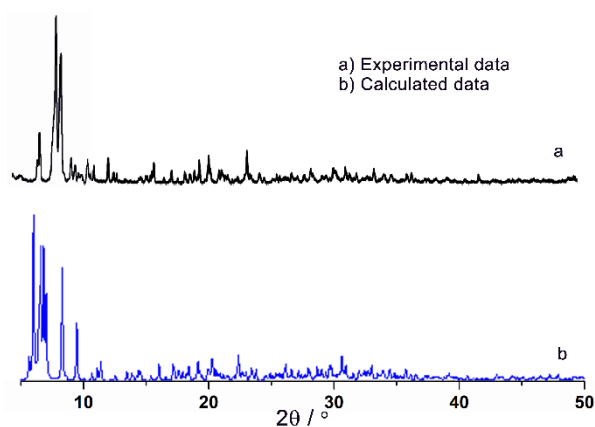
Table 3. Hydrogen-bond parameters for NiBWO (Å, °).

D-H...A	D-H	H...A	D...A	D-H...A
C2—H2...O9	0.93	2.50	3.31 (5)	146
C3—H3...O39	0.93	2.38	3.03 (3)	127
C4—H4...O34 ⁱⁱ	0.93	2.34	3.13 (7)	142
C7—H7...O34 ⁱⁱ	0.93	2.57	3.48 (5)	165
C9—H9...O9 ⁱⁱⁱ	0.93	2.56	3.18 (5)	125
C10—H10...O9 ⁱⁱⁱ	0.93	2.58	3.21 (5)	126
C14—H14...O32 ^{iv}	0.93	2.14	3.05 (6)	167
C17—H17...O32 ^{iv}	0.93	2.23	3.13 (6)	164
C31—H31...O14	0.93	2.48	3.40 (6)	172
C32—H32...O26	0.93	2.30	3.00 (8)	131
C37—H37...O8 ^v	0.93	2.52	3.13 (7)	124
C44—H44...O30 ^{vi}	0.93	2.59	3.38 (7)	144
C60—H60...O26	0.93	2.34	3.14 (10)	144
C64—H64...O27	0.93	2.60	3.50 (7)	162
C64—H64...O27 ^{vii}	0.93	2.47	3.19 (7)	134

**Figure 2.** The molecular view of hydrogen bonds between the POM and $[Ni(2,2'-bipy)_3]^{2+}$ in NiBWO.**Figure 3.** The molecular view of hydrogen bonds between the POM and $[Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)]^{2+}$ in NiBWO.

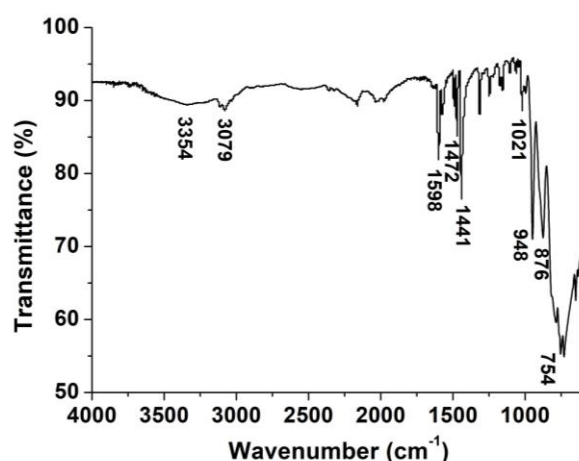
3.2. Powder X-ray diffraction

The measured XRD curve (Figure 4) gives similar results to the calculated model. This confirms the purity of the crystal product. The intensity difference may depend on the preferred direction of the powder samples.

**Figure 4.** Experimental and simulated XRD curves of NiBWO.

3.3. Infrared spectroscopy

The FT-IR spectrum of the NiBWO is shown in Figure 5. In the spectrum, the characteristic band at 948 cm^{-1} is attributed to W–Ot, the band at 876 cm^{-1} is ascribed to W–Ob–W, the band at 754 cm^{-1} is due to W–Oc and the band at 1021 cm^{-1} is ascribed to B–O. The four mentioned peaks are characteristic peaks for $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ (Du et al. 2019). The absorption bands at $1598\text{--}1441\text{ cm}^{-1}$ are due to vibrations of 2,2'-bipy ligand in the NiBWO (Xiao et al. 2018). 3079 cm^{-1} are attributed to the vibrations of the $\nu(\text{C-H})$ in bipy rings of the ligand (Lu et al. 2019). The peaks at ca. 3354 cm^{-1} are attributed to the vibrations of $\nu(\text{H}_2\text{O})$ (Lu et al. 2015).

**Figure 5.** FT-IR spectrum of NiBWO.

3.4. Thermogravimetric analysis

Thermal stability for the NiBWO was investigated by TGA (Figure 6). Firstly, 0.44% weight loss up to 165 °C corresponds to the separation of free water molecules. These water molecules that interact more strongly with the POM frame are separated

from 80 to 200 °C (Canioni et al. 2011). The second weight loss of 8.3% at 560 °C can be attributed to the decomposition of the 2,2'-bipy (Liu et al. 2015). The final mass loss around 880 °C (25.6%) is attributed to the complete rupture of the remainder POM cluster (Lan et al. 2013).

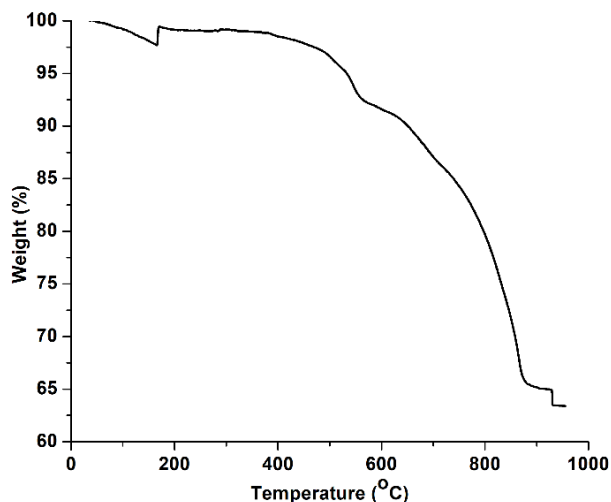


Figure 6. TGA curve of NiBWO.

3.5. SEM analysis

SEM is used to examine the three important factors surfactant morphology (surface structural properties based on shape and size), surface crystallography (ie, surface formation of atoms) and surface composition (in terms of surface composition, compounds and elements). So, the surface property of the NiBWO was checked by using SEM (Figure 7). According to the SEM image, each crystal has a cuboid structure.

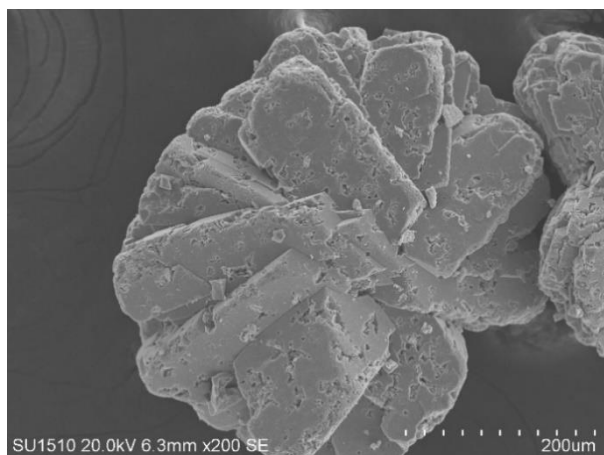


Figure 7. SEM image of NiBWO.

4. Conclusion

A new organic–inorganic hybrid, $\{Ni(2,2'-bipy)_2(H_2O)[BW_{12}O_{40}]\}^{3-}$, compound has been synthesized via a simple route under hydrothermal conditions through carefully tuning the reaction temperature. The use of high temperature bottles used in the synthesis method may be preferred by the researchers in terms of decreasing the cost in subsequent studies. The compound was characterized by X-ray diffraction method, FT-IR spectra and TGA. These analyzes support the results from the single crystal X-ray structural analysis. According to the X-ray, the compound is based on Keggin polyoxoanions.

Acknowledgement

The authors acknowledge Scientific and Technological Research Application and Research Center, Sinop University, Turkey, for the use of the Bruker D8 QUEST diffractometer. The authors thank the Necmettin Erbakan University Research Foundation (151210002).

References

- APEX2, Bruker AXS Inc. Madison Wisconsin USA 2013.
- Berzelius, J.J., 1826. Beitrag zur näheren Kenntniss des Molybdäns. *Annalen der Physik*, **82(4)**, 369–392.
- Cameron, J.M., Wales, D.J. and Newton, G.N., 2018. Shining a light on the photo-sensitisation of organic–inorganic hybrid polyoxometalates. *Dalton Transactions*, **47**, 5120–5136.
- Canioni, R., Roch-Marchal, C., Secheresse, F., Horcajada, P., Serre, C., Hardi-Dan, M., Ferey, G., Greneche, J.M., Lefebvre, F., Chang, J.S., Hwang, Y.K., Lebedev, O., Turner, S.B. and Tendeloo, G.V., 2011. Stable polyoxometalate insertion within the mesoporous metal organic framework MIL-100(Fe). *Journal of Materials Chemistry*, **21**, 1226–1233.
- Du, N., Gong, L., Fan, L., Yu, K., Luo, H., Pang, S., Gao, J., Zheng, Z., Lv, J. and Zhou, B., 2019. Nanocomposites Containing Keggin Anions Anchored on Pyrazine Based Frameworks for Use as Supercapacitors and Photocatalysts. *ACS Applide Nano Materials*, **2**, 3039–3049.
- Farrugia, L.J., 1999. WinGX suite for small-molecule single-crystal crystallography. *Journal of Applied Crystallography*, **32**, 837–838.

- Findik, M., Ucar, A., Colak, A.T., Sahin, O., Bingol, H., Sayin, U. and Kocak, N., 2019. Self-assembly of a new building block of $\{BMo_{12}O_{40}\}$ with excellent catalytic activity for methylene blue. *Polyhedron*, **160**, 229–237.
- Huang, L., Wang, S.S., Zhao, J.W., Cheng, L., Yang, G.Y., 2014. Synergistic combination of multi-ZrIV cations and lacunary keggin germanotungstates leading to a gigantic Zr₂₄-cluster-substituted polyoxometalate. *J. Am. Chem. Soc.*, **136**, 7637–7642.
- Kastner, K., Kibler, A.J., Karjalainen, E., Fernandes, J.A., Sans, V. and Newton, G.N., 2017. Redox-active organic–inorganic hybrid polyoxometalate micelles. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 11577–11581.
- Lan, Q., Zhang, J., Zhang, Z.M., Lu, Y., Wang, E.B., 2013. Two three-dimensional porous frameworks built from metal–organic coordination polymer sheets pillared by polyoxometalate clusters. *Dalton Transactions*, **42**, 16602–16607.
- Liu, J., Zhang, Y., Shang, S., Li, Y., Chen, L. and Zhao, J., 2015. Syntheses, structures and properties of three metal–organic complexes containing 2,2'-dipyridyl-5,5'-dicarboxylate ligands. *Journal of Solid State Chemistry*, **221**, 5–13.
- Lu, X.X., Luo, Y.H., Xu, Y., Zhang, H., 2015. Temperature-dependent assembly of two 3D $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ -based coordination polymers with visible light driven photocatalytic properties. *CrystEngComm*, **17**, 1631–1636.
- Lu, Y.K., Li, Y.P., Yang, Y.L., Wang, W.H., Pan, Y., Yan, W.F., Liu, Y.Q., 2019. Modified polyoxometalate: a novel monocapped bi-supporting and reduced α -Keggin structure $\{PMo_{12}O_{40}[Cu(2,2'-bpy)]\}[Cu(2,2'-bpy)(en)(H_2O)]_2$. *Acta Crystallographica Section C*, **C75**, 1344–1352.
- Shakeri, A., Mighani, H., Salari, N. and Salehi, H., 2019. Surface modification of forward osmosis membrane using polyoxometalate based open frameworks for hydrophilicity and water flux improvement. *Journal of Water Process Engineering*, **29**, 100762.
- Sheldrick, G.M., 2008. A short history of SHELX. *Acta Crystallographica Section A*, **A64**, 112–122.
- Sheldrick, G.M., 2015. Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Crystallographica Section C*, **C71**, 3–8.
- Xiao, L.N., Yang, L.X., Du, X.D., Lan, Q., Zhang, H. and Cui, X.B., 2018. Four new compounds based on Keggin polyoxotungstates and transition metal complexes. *Polyhedron*, **147**, 42–48.
- Zhang, J., Song, Y.F., Cronin, L. and Liu, T., 2008. Self-Assembly of Organic–Inorganic Hybrid Amphiphilic Surfactants with Large Polyoxometalates as Polar Head Groups. *Journal of the American Chemical Society*, **130(44)**, 14408–14409.
- Zhao, W., Cui, J., Hao, J. and Horn, J.D.V., 2019. Co-assemblies of polyoxometalate $\{Mo_{72}Fe_{30}\}$ /double-tailed magnetic-surfactant for magnetic-driven anchorage and enrichment of protein. *Journal of Colloid and Interface Science*, **536**, 88–97.
- Zheng, S.T., Yuan, D.Q., Jia, H.P., Zhang, J., Yang, G.Y., 2007. Combination between lacunary polyoxometalates and high-nuclear transition metal clusters under hydrothermal conditions: I. From isolated cluster to 1-D chain. *Chem. Commun.*, **18**, 1858–1860.
- Zheng, S.T., Yang, G.Y. 2012. Recent advances in paramagnetic-TM-substituted polyoxometalates (TM = Mn, Fe, Co, Ni, Cu). *Chem. Soc. Rev.*, **41**, 7623–7646.
- Zong, L., Wu, H., Lin, H. and Chen, Y., 2018. A polyoxometalate-functionalized two-dimensional titanium carbide composite MXene for effective cancer theranostics. *Nano Research*, **11**, 4149–4168.

İnternet kaynakları

1-Mercury, version 3.3; CCDC, available online via ccdc.cam.ac.uk/products/mercury.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 041301 (582-588)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 041301 (582-588)

DOI: 10.35414/ akufemubid.709937

Araştırma Makalesi / Research Article

New Exact Solutions of Cubic Nonlinear Schrödinger Equation by Using Extended Trial Equation Method

Yusuf PANDIR^{1*}, Tural AĞIR²¹ Yozgat Bozok University, Faculty of Arts & Science, Department of Mathematics, 66100, Yozgat.² Yozgat Bozok University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 66100 Yozgat

* Corresponding author e-mail : yusuf.pandir@bozok.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0274-7901>
turalagir@yahoo.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1521-7873>

Geliş Tarihi: 27.03.2020

Kabul Tarihi: 29.08.2020

Keywords

Extended Trial
Equation Method;
Nonlinear Partial
Differential Equations;
Schrödinger Equation
with a Cubic
Nonlinearity; Exact
Solutions

Abstract

In this study, the extended trial equation method, which allows to obtain exact solutions of the partial differential equations, is investigated. This proposed method is applied to the cubic nonlinear Schrödinger equation and different new exact solutions are obtained. We can state that these new exact solutions are new exact solutions that are not find in the literature. In addition, two and three dimensional graphics drawn to show the physical behavior of these new exact solutions.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Genişletilmiş Deneme Denklemi Yöntemi ile Kübik Lineer Olmayan Schrödinger Denkleminin Yeni Tam Çözümleri

Anahtar kelimeler

Genişletilmiş Deneme
Denklemler Yöntemi;
Küçük Türevli
Diferansiyel
Denklemler; Kübik
Lineer Olmayan
Schrödinger Denklemi;
Tam Çözümler

Öz

Bu çalışmada, kısmi türevli diferansiyel denklemlerin tam çözümlerinin elde edilmesine olanak sağlayan genişletilmiş deneme denklem yöntemi incelenmiştir. Önerilen bu yöntem kübik lineer olmayan Schrödinger denklemine uygulanmış ve farklı yeni tam çözümleri elde edilmiştir. Elde edilen bu yeni tam çözümlerin literatürde bulunmayan yeni tam çözümleri olduğunu ifade edebiliriz. Ayrıca, bulunan bu yeni tam çözümlerin fiziksel davranışlarını göstermek için iki ve üç boyutlu grafikleri çizilmiştir.

1. Introduction

It is important to integrate and solve nonlinear partial derivative differential equations that contain derivative by time, which is encountered in many fields of science. Recently, many studies in order to obtain solutions of the partial differential equations is made. We can use the concept of wave to make the solutions of such equations understandable. These nonlinear events encountered in nature are very common in the

fields of fluid mechanics, plasma physics, optical fibers, solid state physics, biology, chemical kinematics, chemical physics, geochemistry and engineering. A single (solitary) wave is a wave that spreads without changing over time when it moves along with the current speed of the wave in the environment in which it occurs. We know that the application areas of the waves are quite high. For this reason, many different powerful and effective methods have been developed by different scientists, allowing exact solutions of nonlinear

partial differential equations. As a result of these new developed methods, many physical events will be easier to understand with the determination of the new exact solution functions. Therefore, many different approach methods have been proposed and developed. Sine-cosine method Wang (1996), Wazwaz (2008), Hirota's bilinear transformation method Hietarinta (1997), Pashaev and Tanoglu (2005), (G'/G) -expansion method Akbar et al (2013), Shakeel and Mohyud-Din (2015), trial equation method Liu (2006), Liu (2010), Gurefe et al. (2011), Gurefe et al. (2012), extended trial equation method Pandir et al. (2012), Pandir et al. (2013), Gurefe et al. (2013), modified Kudryashov method Pandir (2014), Tandogan et al. (2013) can be given as an example for the proposed and developed complete solution methods.

In 2005, Liu C.S., proposed a powerful method to find complete solutions of nonlinear partial differential equations. Here, its main purpose was to find the solutions of an ordinary differential equation whose solution is not known by using different integration methods and to obtain the solutions of the equations with the finite series solution function that includes the functions consisting of them. Later, with the development of this proposed powerful method, different versions were brought into the literature by many scientists (Gurefe et al. 2011, Gurefe et al. 2012). Recently, the proposed method by Liu has been further developed and introduced into the literature as an extended trial equation method by Gürefe et al (Pandir et al. 2012, Pandir et al. 2013, Gurefe et al. 2013). This extended trial equation method developed has enabled the acquisition of new and exact solutions of the nonlinear partial differential equations.

In this study the developed method is applied to the cubic nonlinear Schrödinger equation. By creating the algorithms required for the extended trial equation method and writing the codes according to the created algorithm, new different exact solutions of the equation which is not found in the literature was obtained. In the next section, the extended trial equation method is described in detail.

2. Extended Trial Equation Method

In this section, it is aimed to find new exact solutions of the nonlinear partial differential equations with the extended trial equation method developed based on the trial equation method. The outlines of the extended trial equation method are expressed in detail. Let's suppose the general form of a nonlinear partial differential equation with independent variables x, y, z, \dots, t as

$$T(u, u_x, u_y, u_z, \dots, u_t, \dots, u_{xx}, u_{xy}, u_{xz}, \dots, u_{xt}, \dots) = 0. \quad (1)$$

The travelling wave transformation is used for the Eq.(1) as follows

$$u(x, y, z, \dots, t) = u(\xi), \quad (2)$$

$$\xi = e_1x + e_2y + e_3z + \dots + e_mt$$

where $e_j \neq 0 (j = 1, 2, 3, \dots, m)$. Substituting Eq. (2) into Eq. (1) reduces a nonlinear ordinary differential equation

$$R(u, u', u'', u''', \dots) = 0. \quad (3)$$

Let's consider the solution of the Eq. (3) with the finite series approach as follows

$$u(\xi) = \sum_{i=0}^{\delta} \tau_i \Gamma^i(\xi) \quad (4)$$

where

$$(\Gamma')^2 = \Lambda(\Gamma) = \frac{\Phi(\Gamma)}{\Psi(\Gamma)} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1\Gamma + \varepsilon_2\Gamma^2 + \dots + \varepsilon_\theta\Gamma^\theta}{\zeta_0 + \zeta_1\Gamma + \zeta_2\Gamma^2 + \dots + \zeta_\epsilon\Gamma^\epsilon}. \quad (5)$$

Here the $\Gamma(\xi)$ functions are the solution functions of the nonlinear ordinary elliptical differential equation. Using Eq (4) and Eq (5), we can write

$$(u')^2(\xi) = \frac{\Phi(\Gamma)}{\Psi(\Gamma)} \left(\sum_{i=0}^{\delta} i\tau_i \Gamma^{i-1}(\xi) \right)^2 \quad (6)$$

$$u''(\xi) = \frac{\Phi'(\Gamma)\Psi(\Gamma) - \Phi(\Gamma)\Psi'(\Gamma)}{2\Psi^2(\Gamma)} \sum_{i=0}^{\delta} i\tau_i\Gamma^{i-1}(\xi) + \frac{\Phi(\Gamma)}{\Psi(\Gamma)} \sum_{i=0}^{\delta} i(i-1)\tau_i\Gamma^{i-2}(\xi) \tag{7}$$

where $\Phi(\Gamma)$ and $\Psi(\Gamma)$ are polynomials. When the obtained derivatives in Eq. (6) and Eq. (7) are examined, as stated in the solution function (4) turns into a polynomial expression linked to a rational $\Gamma(\xi)$ function. The balance procedure according to Eq. (3) is applied in terms of the polynomial equivalent of the highest-order (non-linear) term with the highest-order derivative term. With the balancing procedure, δ in solution function (4), θ and ϵ values in Eq. (5) will be calculated. Some balancing terms are calculated as follows

$$uu'' \rightarrow \Gamma^{\theta+2\delta-\epsilon-2}, (u')^2 \rightarrow \Gamma^{\theta+2\delta-\epsilon-2}, u^2 \rightarrow \Gamma^{2\delta}, u^3 \rightarrow \Gamma^{3\delta}. \tag{8}$$

Thus, when the calculated values are written in place of the expressions, zero polynomial related to the Γ function is obtained. A system of algebraic equations is obtained by synchronizing the related terms in this zero polynomial to zero. When the created algebraic equation system is solved with the help of Mathematica 10 package program, $\epsilon_0, \dots, \epsilon_\theta, \zeta_0, \dots, \zeta_\epsilon$ and $\tau_0, \dots, \tau_\delta$ coefficients are obtained. When the obtained coefficients are replaced in the Eq. (5), $\Gamma(\xi)$ functions are obtained by calculating the integral

$$\pm(\xi - \xi_0) = \int \frac{d\Gamma}{\sqrt{\Lambda(\Gamma)}} = \int \sqrt{\frac{\Psi(\Gamma)}{\Phi(\Gamma)}} d\Gamma. \tag{9}$$

Then, $\Gamma(\xi)$ functions are replaced in solution function (4), respectively. Thus, by applying the transformation in the expression of (2) to the obtained $u(\xi)$ functions, new exact solutions of the Eq. (1) are obtained.

3. Application of the Extended Trial Equation Method

In this section, the extended trial equation method is applied to the cubic nonlinear Schrödinger equation. The cubic nonlinear Schrödinger equation is one of the most important universal nonlinear models that naturally occur in many physical systems. It is a general equation that occurs when a semi-monochromatic wave propagates in a diffuse and weakly nonlinear environment. It has also been used in hydrodynamics to describe various physical phenomena, especially in nonlinear optical fibers, heat transfer in a solid, nonlinear waves in a fluid-filled elastic tube, nonlinear imbalance problems, and solitary wave propagation in piezoelectric semiconductors (Imanli 2006, Sulem and Sulem 1999, Ablowitz *et al.* 2004). The most general form of the cubic nonlinear Schrödinger equation is

$$i \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k|w|^2 w = 0, \tag{10}$$

where w is a complex valued function and k is a real arbitrary parameter (Chand and Malik 2012, Kaplan *et al.* 2016). First let's assume travelling wave transformation to apply the extended trial equation method to Eq. (10)

$$w(x, t) = e^{i\mu} w(\eta), \quad \mu = mx + nt, \quad \eta = lx + ct$$

where m, n, l, c are arbitrary constants. Derivatives and the unknown function in the Eq. (10) are calculated under transformation

$$i \frac{\partial w}{\partial t} = -ce^{i\mu} w - ine^{i\mu} w',$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -m^2 e^{i\mu} w + 2ilm e^{i\mu} w' + l^2 e^{i\mu} w'', \quad |w|^2 = w^2 \tag{11}$$

When these are substituted in the Eq. (10), a non-linear 3rd order ordinary differential equation is obtained

$$(-c - m^2)w + k^3 w^3 + l^2 w'' = 0, \tag{12}$$

where $n = 2lm$. Using the solution function (4) and differential equation (5), the related derivatives are calculated and replaced in Eq. (12). The balancing procedure is applied to determine the δ , θ and ϵ values in solution function (4) and differential equation (5). According to the extended trial equation method, the balance process is determined between the term w'' containing the highest order derivative and the highest order nonlinear term w^3 for Eq. (12) as follows

$$w^3 \rightarrow \Gamma^{3\delta}, w'' \rightarrow \Gamma^{\theta+\delta-\epsilon-2}. \quad (13)$$

Accordingly, the balance term is obtained as $\theta = \epsilon + 2\delta + 2$ from the equivalence of the obtained $w'' \approx w^3$ terms.

To determine the new solution of the Eq. (10), if the balance terms are selected as $\epsilon = 0$ and $\delta = 1$, then $\theta = 4$ is obtained. When these balancing terms are written in solution function (4) and differential equation (5) respectively, we acquire

$$w(\eta) = \tau_0 + \tau_1 \Gamma(\eta), \quad (14)$$

$$(\Gamma')^2 = \frac{\Phi(\Gamma)}{\Psi(\Gamma)} = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_1 \Gamma + \epsilon_2 \Gamma^2 + \epsilon_3 \Gamma^3 + \epsilon_4 \Gamma^4}{\zeta_0}. \quad (15)$$

The term w'' in the Eq. (12) is calculated as

$$w'' = \frac{\tau_1 (\epsilon_1 + 2\epsilon_2 \Gamma + 3\epsilon_3 \Gamma^2 + 4\epsilon_4 \Gamma^3)}{2\zeta_0} \quad (16)$$

where $\epsilon_4 \neq 0$ and $\zeta_0 \neq 0$.

When the calculated values are substituted in the Eq. (12), a polynomial expression based on the $\Gamma(\eta)$ function occurs. If we consider this polynomial as a zero polynomial, the coefficients of this polynomial are equalized to zero, resulting in a system of algebraic equations.

When this algebraic system is solved with the help of Mathematica 10 packet program, coefficients are found as follows

$$\epsilon_0 = \epsilon_0, \quad \epsilon_1 = -\frac{\epsilon_3^3 - 4\epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4}{8\epsilon_4^2}, \quad \epsilon_2 = \epsilon_2, \quad \epsilon_3 = \epsilon_3, \quad \epsilon_4 = \epsilon_4,$$

$$\zeta_0 = -\frac{l^2 \epsilon_3^2}{8k \epsilon_4 \tau_0^2}, \quad \tau_0 = \tau_0, \quad \tau_1 = \frac{4\epsilon_4 \tau_0}{\epsilon_3},$$

$$c = -m^2 + k \left(3 - \frac{8\epsilon_2 \epsilon_4}{\epsilon_3^2} \right) \tau_0^2.$$

(17)

When these obtained coefficients are replaced in Eq. (5) and Eq. (9), an integral is obtained

$$\pm(\eta - \eta_0) = A \int \frac{d\Gamma}{\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_4} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_4} \Gamma(\eta) + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_4} \Gamma^2(\eta) + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_4} \Gamma^3(\eta) + \Gamma^4(\eta)}} \quad (18)$$

where $A = \sqrt{-\frac{l^2 \epsilon_3^2}{8k \epsilon_4 \tau_0^2}}$. It is quite difficult to

calculate the integral in Eq. (18). Integrating Eq. (18), we obtain the solutions of the Eq. (10) as follows:

$$\pm(\eta - \eta_0) = -\frac{A}{\Gamma - \alpha_1}, \quad (19)$$

$$\pm(\eta - \eta_0) = \frac{2A}{\alpha_1 - \alpha_2} \sqrt{\frac{\Gamma - \alpha_2}{\Gamma - \alpha_1}}, \quad \alpha_2 > \alpha_1, \quad (20)$$

$$\pm(\eta - \eta_0) = \frac{A}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \left| \frac{\Gamma - \alpha_1}{\Gamma - \alpha_2} \right|, \quad \alpha_1 > \alpha_2, \quad (21)$$

$$\pm(\eta - \eta_0) = \frac{2A}{\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)}} \ln \left| \frac{\sqrt{(\Gamma - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)} - \sqrt{(\Gamma - \alpha_3)(\alpha_1 - \alpha_2)}}{\sqrt{(\Gamma - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)} + \sqrt{(\Gamma - \alpha_3)(\alpha_1 - \alpha_2)}} \right|$$

$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3,$

(22)

$$\pm(\eta - \eta_0) = \frac{2AF(\varphi, l)}{\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}}, \quad \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4, \quad (23)$$

where $F(\varphi, l) = \int_0^\varphi \frac{d\psi}{\sqrt{1-l^2 \sin^2 \psi}}$,

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{(\Gamma - \alpha_1)(\alpha_2 - \alpha_4)}{(\Gamma - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_4)}}, \quad l^2 = \frac{(\alpha_2 - \alpha_3)(\alpha_1 - \alpha_4)}{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}.$$

Also $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ and α_4 are the roots of the polynomial equation

$$\Gamma^4 + \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} \Gamma^3 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_4} \Gamma^2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_4} \Gamma + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_4} = 0. \quad (24)$$

Substituting the solutions (19-23) into (4) and using travelling wave transformation, we have

$$w_5(x, t) = e^{i\mu_1} \left[\tau_0 + \tau_1 \left(\alpha_2 + \frac{A(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_4 - \alpha_2)}{\alpha_4 - \alpha_2 + (\alpha_1 - \alpha_4) \operatorname{sn}^2 \left[\frac{\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}}{2} (\eta_1 - \eta_0), \frac{(\alpha_2 - \alpha_3)(\alpha_1 - \alpha_4)}{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)} \right]} \right) \right] \quad (29)$$

where $\mu_1 = lx + \left(k \left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2} \right) \tau_0^2 - m^2 \right) t$,

$\eta_1 = m(x + 2lt)$. If taken as $\tau_0 = -\tau_1\alpha_1$ and $\eta_0 = 0$, the equations (25)-(28) are obtained respectively rational function solutions:

$$w_1(x, t) = e^{i \left(lx + \left(k \left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2} \right) \tau_1^2 \alpha_1^2 - m^2 \right) t \right)} \left(\pm \frac{A_1}{m(x + 2lt)} \right), \quad (30)$$

$$w_2(x, t) = e^{i \left(lx + \left(k \left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2} \right) \tau_1^2 \alpha_1^2 - m^2 \right) t \right)} \left(\pm \frac{4A_1(\alpha_2 - \alpha_1)}{4 - (\alpha_1 - \alpha_2)^2 m^2 (x + 2lt)^2} \right), \quad (31)$$

where $A_1 = \tau_1 A$, travelling wave solution:

$$w_3(x, t) = e^{i \left(lx + \left(k \left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2} \right) \tau_1^2 \alpha_1^2 - m^2 \right) t \right)} C_1 \operatorname{coth} [D_1(x + 2lt)] \quad (32)$$

where $C_1 = \pm \tau_1 \alpha_2$ and $D_1 = \frac{m(\alpha_1 - \alpha_2)}{2A}$, soliton solution:

$$w_1(x, t) = e^{i\mu_1} \left[\tau_0 + \tau_1 \left(\alpha_1 \pm \frac{A}{\eta_1 - \eta_0} \right) \right] \quad (25)$$

$$w_2(x, t) = e^{i\mu_1} \left[\tau_0 + \tau_1 \left(\alpha_1 \pm \frac{4A(\alpha_2 - \alpha_1)}{4 - (\alpha_1 - \alpha_2)^2 (\eta_1 - \eta_0)^2} \right) \right] \quad (26)$$

$$w_3(x, t) = e^{i\mu_1} \left[\tau_0 + \tau_1 \left(\frac{\alpha_2 e^{\pm(\alpha_1 - \alpha_2)(\eta_1 - \eta_0)} - \alpha_1}{e^{\pm(\alpha_1 - \alpha_2)(\eta_1 - \eta_0)} - 1} \right) \right] \quad (27)$$

$$w_4(x, t) = e^{i\mu_1} \left[\tau_0 + \tau_1 \left(\alpha_1 - \frac{2A(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)}{2\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 + (\alpha_3 - \alpha_2) \cosh \left[\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)} (\eta_1 - \eta_0) \right]} \right) \right] \quad (28)$$

$$w_4(x, t) = e^{i \left(lx + \left(k \left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2} \right) \tau_1^2 \alpha_1^2 - m^2 \right) t \right)} \frac{C_2}{E_1 + \cosh [D_2(x + 2lt)]} \quad (33)$$

where $C_2 = \frac{-2(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)}{\alpha_3 - \alpha_2}$,

$$E_1 = \frac{2\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3}{\alpha_3 - \alpha_2} \text{ and } D_2 = \frac{m\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)}}{A}.$$

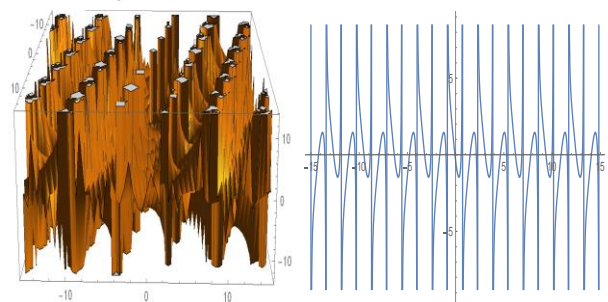


Fig. 1. Three and two dimensional graphical for $\xi_2 = \tau_0 = \tau_1 = l = m = 2$, $k = \frac{1}{2}$, $\alpha_1 = \xi_4 = 1$, $\alpha_2 = \frac{3}{2}$, $\xi_3 = 4$ of the solution (32).

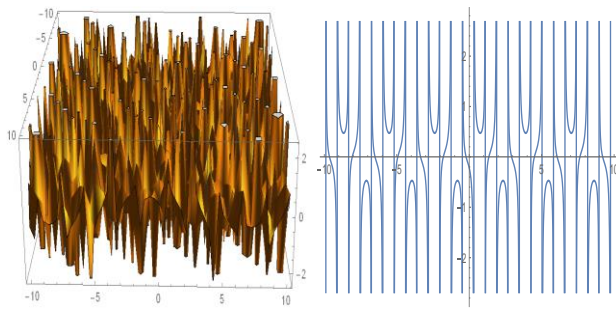


Fig. 2. Three and two dimensional graphical for $\xi_2 = \tau_0 = \tau_1 = l = m = 2$, $\alpha_3 = k = \frac{1}{2}$, $\alpha_1 = \xi_4 = 1$, $\alpha_2 = \frac{3}{2}$, $\xi_3 = 4$ of the solution (33).

If $\tau_0 = -\tau_1\alpha_2$ is taken in Eq. (29), an Jacobi elliptic function solution is found as

$$w_5(x,t) = e^{i\left\{lx + \left(k\left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2}\right)\tau_1^2\alpha_1^2 - m^2\right)t\right\}} \frac{C_3}{E_2 + sn^2(\varphi_1, l_1)} \tag{34}$$

where $C_3 = \frac{\tau_1(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_4 - \alpha_2)}{\alpha_1 - \alpha_4}$, $E_2 = \frac{\alpha_4 - \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_4}$,

$$\varphi_1 = \frac{m\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}}{2A}(x + 2lt),$$

$$l_1^2 = \frac{(\alpha_2 - \alpha_3)(\alpha_1 - \alpha_4)}{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}.$$

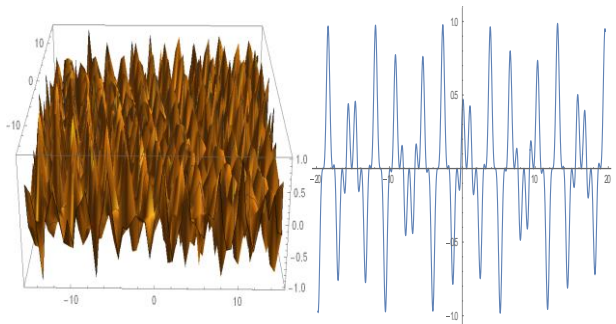


Fig. 3. Three and two dimensional graphical for $\xi_2 = \tau_0 = \tau_1 = l = \alpha_4 = m = 2$, $\alpha_3 = k = \frac{1}{2}$, $\xi_3 = 4$, $\alpha_1 = \xi_4 = 1$, $\alpha_2 = \frac{3}{2}$ of the solution (34).

Here, C_2 indicates the amplitude of the soliton and D_2 indicates the inverse width of the solitons.

In addition, if we take the module as $l \rightarrow 1$ in the elliptic solution Eq.(34), then the solution of the Eq. (10) turns into the following hyperbolic function solution

$$w_6(x,t) = e^{i\left\{lx + \left(k\left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2}\right)\tau_1^2\alpha_1^2 - m^2\right)t\right\}} \frac{C_3}{E_2 + \tanh^2\left[\frac{m\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}}{2A}(x + 2lt)\right]} \tag{35}$$

where $\alpha_3 = \alpha_4$.

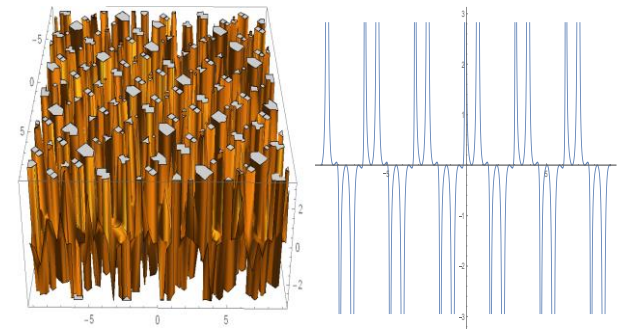


Fig. 4. Three and two dimensional graphical for $\xi_2 = \tau_0 = \tau_1 = m = 2$, $\alpha_3 = k = \frac{1}{2}$, $\alpha_1 = \xi_4 = 1$, $\alpha_2 = \frac{3}{2}$, $\xi_3 = 4$ of the solution (35).

On the other hand; when the module is selected as $l \rightarrow 0$ in the jaccobi elliptic solution Eq. (34), then the solution of the Eq. (10) turns into the following periodic wave solution

$$w_7(x,t) = e^{i\left\{lx + \left(k\left(3 - \frac{8\varepsilon_2\varepsilon_4}{\varepsilon_3^2}\right)\tau_1^2\alpha_1^2 - m^2\right)t\right\}} \frac{C_3}{E_2 + \sin^2\left[\frac{m\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_3)(\alpha_2 - \alpha_4)}}{2A}(x + 2lt)\right]} \tag{36}$$

where $\alpha_2 = \alpha_3$.

When all the solutions obtained from the cubic nonlinear Schrödinger equation are examined; Eq. (33) exact solution is similar to the solution in the literature. Other solutions are the exact solutions that are not included in the literature. With the proposed method, new exact solutions of this equation are obtained. The graphs of the obtained solution functions are shown in Fig. 1-4.

4. Conclusion

In this paper, the extended trial equation method has been used to obtain a new exact solutions of the cubic nonlinear Schrödinger equation. This method makes it possible to achieve the rational function solutions, travelling wave solution, soliton solution and an Jacobi elliptic function solution. We suppose that this method can also be implemented to other nonlinear differential equations.

5. References

- Ablowitz, M.J., Prinari, B. and Trubatch, A.D., 2004. Discrete and Continuous Nonlinear Schrödinger Systems, Cambridge Univ. Press, 18-45.
- Akbar, M.A., Ali, N.H.M. and Mohyud-Din, S.T., 2013. The modified alternative (G'/G) -expansion method to nonlinear evolution equation: application to the (1+1)-dimensional Drinfel'd-Sokolov-Wilson equation. *SpringerPlus*, **327**, 2-16.
- Chand, F. and Malik, A.K., 2012. Exact traveling wave solutions of some nonlinear equations using (G'/G) -expansion method. *International Journal of Nonlinear Science*, **14(4)**, 416-424.
- Gurefe, Y., Sonmezoglu A. and Misirli, E., 2011. Application of trial equation method to the nonlinear partial differential equations arising in mathematical physics. *Pramana-Journal of Physics*, **77(6)**, 1023-1029.
- Gurefe, Y., Sonmezoglu A. and Misirli, E., 2012. Application of an irrational trial equation method to high dimensional nonlinear evolution equations. *Journal of Advanced Mathematical Studies*, **5(1)**, 41-47.
- Gurefe, Y., Misirli, E., Sonmezoglu, A., Ekici, M., 2013. Extended trial equation method to generalized nonlinear partial differential equations. *Applied Mathematics and Computation*, **219(10)**, 5253-5260.
- Hietarinta, J., 1997. Hirota's bilinear method and its generalization. *International Journal of Modern Physics A*, **12(1)**, 43-51.
- Imanli, M.I., 2006. Nonlinear Schrödinger equations in homogenous space. MSc thesis, Marmara University, Graduate School of Science and Engineering, Istanbul, 43.
- Kaplan, M., Ünsal, Ö. and Bekir, A., 2016. Exact solutions of nonlinear Schrödinger equation by using symbolic computation. *Mathematical Methods in the Applied Science*, **39**, 2093-2099.
- Liu, C.S., 2006. Trial equation method for nonlinear evolution equations with rank inhomogeneous: mathematical discussions and applications. *Communications in Theoretical Physics*, **45(2)**, 219-223.
- Liu, C.S., 2010. Applications of complete discrimination system for polynomial for classifications of traveling wave solutions to nonlinear differential equations. *Computer Physics Communications*, **181(2)**, 317-324.
- Pandir, Y., Gurefe, Y., Kadak, U. and Misirli, E., 2012. Classifications of exact solutions for some nonlinear partial differential equations with generalized evolution. *Abstract and Applied Analysis*, **2012**, Article ID 478531, 16 pp.
- Pandir, Y., Gurefe, Y. and Misirli, E. 2013. Classification of exact solutions to the generalized Kadomtsev-Petviashvili equation. *Physica Scripta*, **87(2)**, 025003, 12 pp.
- Pandir Y., 2014. Symmetric Fibonacci function solutions of some nonlinear partial differential equations. *Applied Mathematics & Information Science*, **8**, 2237-2241.
- Pashaev, O. and Tanoglu, G., 2005. Vector shock soliton and the Hirota bilinear method. *Chaos, Solitons & Fractals*, **26**, 95-105.
- Shakeel, M. and Mo hyud-Din, S. T., 2015. New (G'/G) -expansion method and its application to the Zakharov-Kuznetsov-Benjamin-Bona-Mahony (ZK-BBM) equation. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic & Applied Science*, **18(1)**, 66-81.
- Sulem C. and Sulem P.L. 1999. The nonlinear Schrödinger equation self-focusing and wave collapse. Springer, New-York, 161-186.
- Tandogan, Y.A., Pandir, Y. and Gurefe, Y., 2013. Solutions of the nonlinear differential equations by use of modified Kudryashov method. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, **1**, 54-60.
- Wang M. L., 1996. Exact solutions for compound KdV-Burgers equations. *Physics Letters A*, **213**, 279-287, 1996.
- Wazwaz A. M., 2008. A sine-cosine method for handling nonlinear wave equations. *Mathematical and Computer Modelling*, **40(5-6)**, 499-508.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045401 (589-597)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045401 (589-597)

DOI: 10.35414/ akufemubid.613129

Araştırma Makalesi / Research Article

Evsel ve Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Toprak Düzenleyici Etkisinin Değerlendirilmesi

Fatma Olcay TOPAÇ ŞAĞBAN^{1*}, Esra DEMİR²¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa² Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği A.B.D., BursaSorumlu yazar e-posta: olcaytopac@uludag.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6364-4087>esrademir796@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2158-6744>

Geliş Tarihi: 29.08.2019

Kabul Tarihi: 19.08.2020

Öz

Atıksuların arıtılması neticesinde oluşan arıtma çamurlarının yeniden kullanılmasının sağlanması, atık arıtma sektöründeki öncelikli konulardan biri olarak kabul edilmektedir. Atıksu arıtma çamurlarının bünyesinde bulunan çeşitli organik ve inorganik bileşikler, bu atıkların toprak düzenleyici olarak değerlendirilmesi alternatifini de beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda, toprakta kullanılabilme potansiyeline sahip çamurların toprağa yapacağı katkıların ve/veya etkilerin laboratuvar ortamında yürütülen inkübasyon çalışmalarına değerlendirilmesi fayda sağlamakta ve yol gösterici olmaktadır. Bu çalışmada, stabil hale getirilen evsel ve evsel nitelikli (gıda) arıtma çamurları 100t/ha oranında topraklara uygulanmış ve 12 aylık bir inkübasyon çalışması yürütülerek toprağın bazı kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Yapılan araştırma sonuçlarına göre, denenen dozda çamur uygulaması toprakların pH değerini hafifçe düşürürken (maksimum 1 birim), EC_{25°C} değerlerini arttırmıştır. Toprağa yapılan tüm arıtma çamuru uygulamalarının, kontrol toprağında yaklaşık %1,6 seviyelerindeki kolay okside olabilir organik karbon içeriğini %2-2,6 seviyelerine çıkarttığı tespit edilmiştir. Çamur uygulanmış topraklarda amonyum azotu değerleri kontrole göre çok büyük artış göstermezken nitrat azotu değerleri belirgin şekilde artmış ve 12 aylık inkübasyon döneminin sonunda 713 ila 1048 mg/kg seviyelerine ulaşmıştır. Yarıyıllık fosfor konsantrasyonunun da çamur uygulamasına bağlı olarak 24-30 mg PO₄-P/kg seviyelerinden 44-91 mg PO₄-P/kg seviyelerine çıktığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, 100 t/ha oranında yapılan evsel ve evsel nitelikli arıtma çamuru uygulamaları ile toprağın organik madde ve bitki besin maddesi içeriklerinin arttığı ve topraktaki biyokimyasal fonksiyonların geliştiği izlenimi edinilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen parametreler itibarıyla denenen arıtma çamurlarının toprak düzenleyici olarak kullanım potansiyelinin oldukça yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler

Arıtma Çamuru;
İnkübasyon; Toprak;
Toprak Düzenleyici;
Yeniden Kullanım

Evaluation of Soil Conditioner Effects of Domestic and Domestic-Like Wastewater Sludges

Abstract

Reuse of wastewater sludges resulting from the treatment of wastewater is considered as a priority issue in the waste treatment sector. Various organic and inorganic compounds found in wastewater sludges provide an alternative to the evaluation of these wastes as soil conditioner. In this context, it is beneficial and guiding to evaluate the contributions and/or impacts of suitable sludges with the laboratory incubation studies. In this study, stabilized domestic and domestic-like (food) wastewater sludges were applied to the soil at a rate of 100t/ha and a 12-month incubation study was carried out to investigate the changes in some chemical properties of the soil. According to the results, sludge application decreased the pH of the soils slightly (maximum 1 unit) and increased the EC_{25°C} values markedly. It has been found that all sludge applications increased the easily oxidizable organic carbon content of control soil from 1.6% to 2.45-2.75%. Ammonium nitrogen values in sludge treated soils did not increase significantly compared to control, while nitrate nitrogen values increased significantly and

Keywords

Wastewater Sludge;
Incubation; Soil; Soil
Conditioner; Reuse

reached 713 to 1048 mg/kg levels after 12 months incubation period. In addition, available phosphorus concentration increased from 24-30 mg PO₄-P/kg to 44-91 mg PO₄-P/kg. As a result, the organic and plant nutrient contents of the soil increased and biochemical functions of the soil improved with wastewater sludge applications with dose of 100 t/ha. It is concluded that the potential use of the tested wastewater sludges as soil conditioners is quite high with respect to the parameters examined.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde evsel ve endüstriyel alanlardaki su kullanımının artmış olmasına bağlı olarak, ortaya çıkan atıksuların uygun yöntemlerle arıtılması ve doğal çevre ile insan sağlığına zarar vermeden bertarafı, yoğun çabaların harcandığı öncelikli çevre konuları arasında yerini almıştır. Atıksuların farklı arıtma teknolojileriyle arıtılıp yeniden kullanılması veya uygun alıcı ortama deşarjı ile olası çevresel problemler minimize edilmekle beraber tamamen ortadan kalkmamaktadır. Zira, atıksuyun arıtılması esnasında ortaya çıkan arıtma çamurlarının da uygun şekilde arıtımı ve bertarafı gerekmektedir. Arıtma çamurları, endüstriyel ya da evsel nitelikli atık suların arıtımı proseslerinde yer alan çeşitli arıtım kademelerinde yan ürün olarak açığa çıkan, yarı katı haldeki artık maddeler olarak tanımlanmakta olup, özellikleri, atıksu özellikleri ile uygulanan arıtma teknolojisine bağlı olarak büyük oranda değişmektedir (Kumar *et al.* 2017).

Son yıllarda üzerinde önemle durulan atık azaltma ve geri dönüşüm-yeniden kullanım politikalarına paralel olarak, çamur oluşumunun önlenmesi/azaltılması ve/veya oluşan uygun özelliklerdeki arıtma çamurlarının yeniden kullanılmasının sağlanması şüphesiz ki atık arıtma sektöründeki öncelikli konulardan biri olmuştur. Bu kapsamda, arıtma çamurlarının arazide bertarafı nihai bir bertaraf yöntemi olarak düşünülmemeli, arıtma çamurunun yeniden kullanımının sağlanması olarak değerlendirilmelidir. Zira, işlenerek stabil hale getirilen uygun özellikteki arıtma çamurlarının tarımsal amaçlı organik gübre veya toprak düzenleyici olarak kullanılabilme potansiyeli mevcuttur. Arıtma çamurlarının içerdikleri bitki besin maddeleri ve organik maddeler itibarıyla, ticari gübrelere alternatif olabilecek bir gübre kaynağı olarak kullanılabilmesini, bitkiler için çeşitli besin maddelerini sağlayarak toprağın üretkenliğini

arttırdığını ve bitki büyümesini stimüle ettiğini gösteren çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yaman ve Olhan (2011) tarafından yapılan çalışmada, arıtma çamuru kullanılarak ve kullanılmadan yapılan buğday üretiminin ekonomik sonuçları irdelenmiştir. Bu araştırma sonuçları; çamur kullanımının buğday verimini %17,63 ve brüt kârı %64,90 arttırdığını, üretim maliyetini ise %26,01 azalttığını göstermiştir. Piriç (Oryza sativa L.) bitkisinin farklı oranlarda arıtma çamuru uygulamasına verdiği biyokimyasal ve fizyolojik tepkilerin araştırıldığı diğer bir çalışmada, bitkilerdeki fotosentez ve stoma iletkenliği oranları ile klorofil ve protein içeriklerinin çamur uygulamasına bağlı olarak arttığı ifade edilmiştir (Singh and Agrawal 2010). Silva *et al.* (2010) tarafından yapılan başka bir çalışmada kompostlanmış tabakhane çamurlarının kırmızı biber (Capsicum) bitkisinin büyümesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada toprağa yapılan tüm çamur kompostu uygulamalarının bitkilerdeki yaprak ve meyve sayısını, gövde uzunluğunu ve klorofil içeriğini kontrole göre önemli ölçüde arttırdığı vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda, kırmızı biber (Capsicum) bitkisinin kompostlanmış tabakhane çamuru uygulanan topraklarda yetiştirilmek için iyi bir seçenek olabileceğinin de altı çizilmiştir. Bu ve benzeri çalışmalar uygun özellikler taşıyan arıtma çamurlarının toprağa uygulanmasının, bitkilerin beslenmesi açısından ticari gübrelemeye ciddi bir alternatif olabileceğine işaret etmektedir. Tarımsal amaçla kullanılması mümkün olmayan arazilerin uygun özellikteki arıtma çamurları ile desteklenerek ıslah olması ve tarımsal değeri olan araziler haline dönüştürülmesi de mümkündür (Walker and Bernal 2008; Pepper *et al.* 2012). Diğer taraftan uygun yöntemlerle arıtılmamış ve uygun özellikler taşımayan arıtma çamuru uygulamalarına bağlı olarak toprak ve yeraltı sularının patojen, ağır metal ve diğer toksik

kimyasallarca kirlenmesi riskini ortaya koyan çok sayıda çalışma yapılmıştır (Ghazy *et al.* 2009; Sharma *et al.* 2017; Sidhu and Toze, 2009). Bütün bu çalışmalar arıtma çamurlarının topraktaki kullanım potansiyelinin uygulama öncesi titizlikle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Arıtma çamurlarının tarım arazilerinde insan gıdası olarak kullanılan bitkilerin yetiştirilmesinde kullanılması, az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, mevzuata uygunluğun denetimi ile uygulama sırası ve sonrasındaki izleme çalışmalarında oluşabilecek aksamalardan dolayı bir risk oluşturabilmektedir. Bu bakış açısıyla, stabilize edilmiş, belirgin seviyede organik madde içeren ve bitki besin maddelerince zengin olan evsel ve evsel nitelikli arıtma çamurlarının toprak özelliklerini geliştirmek veya ıslah etmek amacıyla toprak düzenleyici olarak kullanımı daha akılcı bir alternatif olabilmektedir. Bu kapsamda, toprakta kullanılabilme potansiyeline sahip çamurların toprağa yapacağı katkıların ve/veya etkilerin laboratuvar ortamında yürütülen inkübasyon çalışmalarıyla değerlendirilmesi şüphesiz büyük fayda sağlayacak ve yol gösterici olacaktır.

Bu çalışmada 3 farklı tesisten alınan evsel ve evsel nitelikli stabilize arıtma çamurlarının bazı toprak özellikleri üzerindeki etkilerinin bir inkübasyon çalışmasıyla değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda çamur örnekleri 100t/ha oranında toprağa uygulanmış ve 12 ay süren bir toprak inkübasyon çalışması yürütülmüştür. 3, 6 ve 12 aylık inkübasyon süreleri sonunda topraklardaki pH, elektriksel iletkenlik, amonyum azotu, nitrat azotu, kolay okside olabilir organik karbon ve yarıyıllı fosfor parametrelerindeki çamur kullanımına bağlı değişimler irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan çamur örneklerinden biri (AÇ1) Bursa'daki enerji ve haberleşme kabloları üreten bir fabrikanın evsel nitelikli atıksularının aerobik olarak arıtıldığı paket atıksu arıtma tesisi çamur susuzlaştırma yatağından alınmıştır. Çalışma kapsamında değerlendirilen ikinci çamur örneği ise (AÇ2) maya üretiminden kaynaklanan atıksular ile

evsel nitelikli suların birlikte anaerobik olarak arıtıldığı bir arıtma tesisinden temin edilmiştir. AÇ3 olarak kodlanan diğer çamur ise 40 çeşit üründe işlenmiş sebze ve meyve üretimi yapılan bir konserve gıda üretim fabrikasının atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. Arıtma tesisine gelen atıksu bileşkesi evsel nitelikli atıksular ve sebze-meyve işleme proses sularından oluşmaktadır. Arıtma çamurlarının uygulanacağı toprak örneği ise Bursa-Özlüce bölgesindeki bir tarım arazisinden 0-20 cm derinlikten uygun yöntemlerle alınmıştır. Toprak örneği killi bünyede olup %28 kum, %30 silt ve %42 kil içermektedir. Toprak örneği ile arıtma çamurlarının bazı özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan toprak ve arıtma çamuru örneklerinin bazı özellikleri.

Parametre	AÇ1*	AÇ2	AÇ3	Toprak
pH (1:5)	7,25	8,72	6,58	7,82
EC, mS.cm ⁻¹ 25°C (1:5)	3,83	9,70	6,39	539
Org.C, %	30	17	28	1,6
Toplam N, %	4,70	2,24	5,11	0,15
NH ₄ ⁺ -N, mg.kg ⁻¹	390,9	49,00	954,4	10,38
NO ₃ ⁻ -N, mg.kg ⁻¹	78,63	56,00	44,79	31,00
Toplam P, %	0,9	1,0	0,5	0,3
Yarıyıllı PO ₄ -P, mg kg ⁻¹	221,7	511,8	186,7	25,69
F.Koliform**,EMS.g ⁻¹	1,03x10 ⁶	6,2x10 ³	6,7x10 ⁴	-

*AÇ1:evsel arıtma çamuru, AÇ2:maya endüstrisi arıtma çamuru, AÇ3:konserve gıda endüstrisi arıtma çamuru

**Arıtma çamurlarının %90 kuru madde seviyelerine kadar kurutulmasıyla, fekal koliform sayıları <10² EMS.g⁻¹ kuru çamur seviyelerine düşmüştür.

2.2 İnkübasyon çalışması

Çalışma kapsamında 500 g'lık plastik kaplara konulan toprak örneklerine 100 t/ha oranında stabilize arıtma çamuru uygulanmış, karışımlar tarla kapasitesinin % 70'i oranında nemlendirilmiş ve 28°C'ye ayarlanmış inkübatörde inkübasyona alınmıştır. Toprak kapları gün aşırı tartılıp, gerektiğinde su ilavesi yapılmış ve nem miktarının inkübasyon periyodunca sabit kalmasına özen gösterilmiştir. 3, 6 ve 12 aylık inkübasyon sürelerinden sonra alınan toprak örneklerinde pH, EC_{25°C}, kolay okside olabilir organik karbon, amonyum azotu, nitrat azotu ve yarıyıllı fosfor konsantrasyonları belirlenmiştir.

2.3 Laboratuvar analizleri

Toprakların tekstürleri mekanik analiz yöntemi ile belirlenmiştir (Gee and Bauder 1982). Toprak ve çamur örneklerinin pH ve EC_{25°C} değerleri, 1:5 (ağırlık/hacim) kuru madde su ekstraktında ölçülmüştür (Mc Lean 1982; Rhoades 1982). Toplam-N miktarı Kjeldahl yöntemiyle, amonyum-N ve nitrat-N konsantrasyonları ise su buharı destilasyonu ile belirlenmiştir (Bremner and Mulvaney 1982; Keeney and Nelson 1982). Toplam P belirlenmesi için nitrik asit-sülfürik asit karışımıyla yaş yakma yapılmış, yarayışlı P için ise NaHCO₃ ekstraksiyonu uygulanmıştır (Olsen and Sommers 1982). Ekstraktlardaki P askorbik asit yöntemine göre belirlenmiştir (APHA, AWWA and WEF 1998). Örneklerdeki kolay okside olabilir organik karbon miktarlarının belirlenmesi için Walkley-Black yöntemi uygulanmıştır (Nelson and Sommers 1982). Arıtma çamuru örneklerindeki fekal koliform sayısı Standart Metotlar'da verilen en muhtemel sayı yöntemine göre belirlenmiştir. Büyüme ortamı olarak Brilliant Green Bile Broth kullanılmıştır (APHA, AWWA and WEF 1998).

2.4 İstatistiksel analiz

Yapılan çamur uygulamalarının ve zamanın çalışma kapsamında belirlenen parametreler üzerindeki etkilerini değerlendirmek üzere STATISTICA programı kullanılarak iki yönlü varyans analizi uygulanmıştır ve ortalama değerler Tukey HSD çoklu karşılaştırma testi kullanılarak kıyaslanmıştır. İki yönlü varyans analizine ilişkin sonuçlar Çizelge 2'de özetlenmiştir.

3. Bulgular ve tartışma

Arıtma çamuru uygulanmış topraklardaki pH ve EC parametrelerinin inkübasyon süresince değişimi Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan varyans analizi sonuçlarına göre, toprağa yapılan uygulamalar ve inkübasyon zamanının pH ve EC parametreleri üzerindeki etkisi istatistiksel olarak $p < 0,001$ düzeyinde önemli bulunmuştur (Çizelge 2). Kurutulmuş çamur uygulanan topraklarda belirlenen pH değerlerinin tüm inkübasyon dönemlerinde kontrol değerlerinden daha düşük ($p < 0,001$) olduğu Şekil 1'den görülmektedir. Ayrıca

çamur uygulaması yapılan ve yapılmayan toprakların pH değerinde inkübasyon süresine bağlı genel bir azalma eğilimi olduğu gözlenmiştir.

Mohammad ve Athamneh (2004) hektar başına 160 ton arıtma çamuru uyguladıkları çalışmalarında organik maddenin parçalanıp mineralize olmasıyla açığa çıkan amin asitleri sebebiyle toprak pH'sının 8,15 değerinden 7,22'ye düştüğünü bildirmişlerdir.

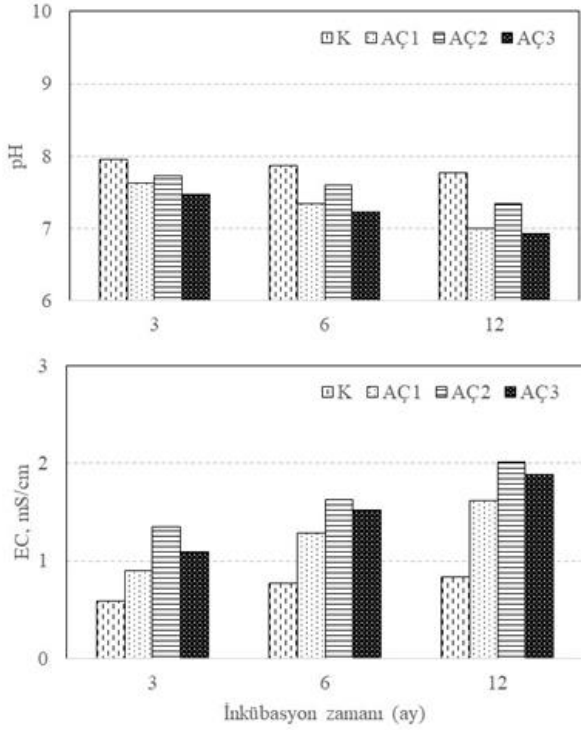
Çizelge 2. İki yönlü varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	df	MS	F	p
Bağımlı Değişken: pH				
Toprağa yapılan uyg. (U)	3	0,782	93,8	<0,001
İnkübasyon zamanı (T)	2	0,599	71,8	<0,001
UxZ	6	0,033	4,0	<0,01
Hata	24	0,008		
Bağımlı Değişken: EC 25°C				
Toprağa yapılan uyg.(U)	3	1,5169	552,16	<0,001
İnkübasyon zamanı (T)	2	1,0505	382,40	<0,001
UxZ	6	0,0486	17,70	<0,001
Hata	24	0,0027		
Bağımlı Değişken: Kolay okside olabilir organik karbon				
Toprağa yapılan uyg.(U)	3	1,9467	51,985	<0,001
İnkübasyon zamanı (T)	2	0,0782	2,089	ö.d*
UxZ	6	0,0629	1,679	ö.d.
Hata	24	0,0374		
Bağımlı Değişken: Amonyum azotu				
Toprağa yapılan uyg. (U)	3	511,1	36,706	<0,001
İnkübasyon zamanı (T)	2	2360,3	169,50	<0,001
UxZ	6	412,2	29,601	<0,001
Hata	24	13,9		
Bağımlı Değişken: Nitrat azotu				
Toprağa yapılan uyg. (U)	3	640646	4473,5	<0,001
İnkübasyon zamanı (T)	2	797500	5568,8	<0,001
UxZ	6	49615	346,45	<0,001
Hata	24	143		
Bağımlı Değişken: Yarayışlı fosfor				
Toprağa yapılan uyg.(U)	3	5243,6	175,98	<0,001
İnkübasyon zamanı (T)	2	263,77	8,853	<0,01
UxZ	6	9,78	0,328	ö.d.
Hata	24	29,80		

*ö.d.:önemli değil

Kontrol toprağının pH değeri 12 aylık inkübasyon sonunda yaklaşık 0,2 birim kadar düşerken, çamur uygulanmış topraklarda inkübasyon sonunda maksimum 1 birimlik bir pH düşmesi gözlenmiştir. Çamurla birlikte toprak ortamına katılan organik maddelerin huminleşme ve mineralizasyonları esnasında biyolojik aktiviteye bağlı olarak oluşan küçük moleküllü organik ve anorganik asitlerin aktif asitliği arttırdığı ve muhtemelen pH değerini düşürmüş olabileceği düşünülmektedir. Benzer şekilde, Ünal (2002) ve Mazen *et al.* (2010) tarafından yürütülen çalışmalarda da çamur

uygulanmış toprakların pH değerlerinin inkübasyon süresi arttıkça bir azalma eğilimi gösterdiği vurgulanmıştır. Toprağa uygulanan biyokatılardaki organik madde içeriği ve buna bağlı olarak meydana



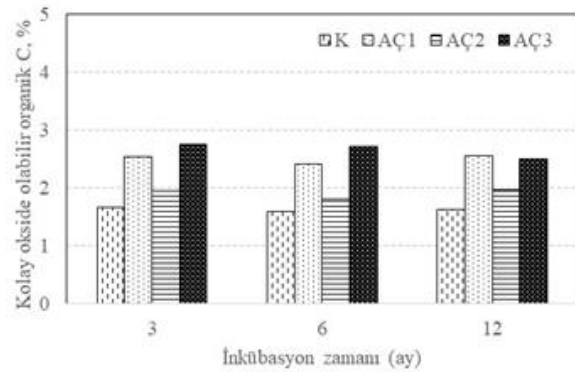
Şekil 1. Aritma çamuru uygulanmış topraklardaki pH ve EC'nin inkübasyon süresince değişimi (K:arıtma çamuru uygulanmamış kontrol toprağı, AÇ1:evsel arıtma çamuru, AÇ2: maya endüstrisi arıtma çamuru, AÇ3:konserve gıda endüstrisi arıtma çamuru)

Çamur uygulanmış topraklarda inkübasyon süresince meydana gelen elektriksel iletkenlik değişimleri incelendiğinde (Şekil 1), tüm çamur uygulamalarının toprağın $EC_{25^{\circ}C}$ değerini belirgin şekilde arttırdığı ($p < 0,001$) açıkça görülmüştür. $EC_{25^{\circ}C}$ değerlerindeki en belirgin artış, tuzluluğu en yüksek olan (Tablo 1) maya endüstrisinden temin edilen çamurun uygulandığı topraklarda meydana gelmiştir ($p < 0,001$). Çalışmada kullanılan kontrol toprağının $EC_{25^{\circ}C}$ değeri 0,539 mS/cm olup, inkübasyon süresince hafif bir artış meydana gelmiş ve 12. ay sonunda 0,830 mS/cm değerine ulaşılmıştır. Çamur uygulanmış topraklarda ise $EC_{25^{\circ}C}$ değerinin uygulanan çamurların tuz içeriğine bağlı olarak belirgin şekilde arttığı ve 12. ayın sonunda çamur uygulanmış topraklardaki $EC_{25^{\circ}C}$ değerinin

gelen bakteriyal metabolik aktivite artışı, organik asit üretimini arttırmakta ve asitleşmeye sebep olmaktadır (Sepúlveda–Varas *et al.* 2011).

1,62-2,01 mS/cm seviyelerine çıktığı görülmüştür. Mineralizasyona bağlı pH düşmeleri ve çökelmiş/bağlı tuzların havanın karbondioksiti etkisiyle serbest hale geçmeleri sebebiyle EC değerlerinin zamana bağlı olarak arttığı izlenimi edinilmiştir. Arıtma çamuru uygulamalarının toprak tuzluluğunu ciddi boyutlarda arttırdığı veya arttırabileceği çok sayıda çalışmada da vurgulanmıştır (Gaskin *et al.* 2003; Nikzad *et al.* 2015). Elektriksel iletkenliğin yüksek oluşu, topraktaki tuz ve/veya suda çözünür bileşiklerin seviyelerinin yüksek olduğunu göstermekte olup organik maddenin mineralizasyonu ile açığa çıkan çözünür azot bileşikleri elektriksel iletkenliği arttırabilmektedir. Gabrielle *et al.* (2005) tarafından yapılan çalışmada, organik azotun mineralizasyon sürecinde amonyağa dönüşmesiyle tuz konsantrasyonunun arttığı ve toprak pH'sının düştüğü belirlenmiştir.

Farklı orijinli arıtma çamurlarının uygulandığı topraklardaki kolay okside olabilir organik karbon yüzdelerinin inkübasyon süresince gösterdiği değişim Şekil 2.'de verilmiştir. Toprağa yapılan tüm arıtma çamuru uygulamalarının, kontrol toprağında yaklaşık %1,6 seviyelerindeki organik karbon içeriğini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Evsel nitelikli çamur (AÇ1) ile konserve gıda endüstrisi kökenli çamur (AÇ3) uygulanan toprakların organik karbon içerikleri 12. ayın sonunda %2 ila %2,55 seviyelerinde belirlenmiştir.



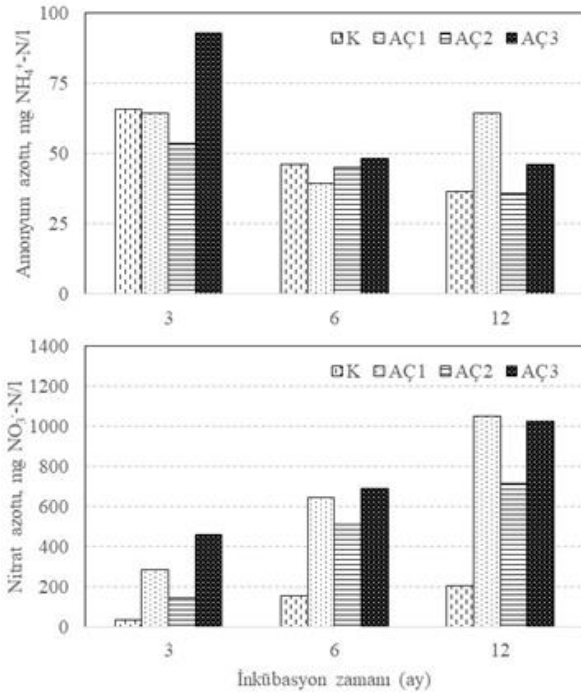
Şekil 2. Aritma çamuru uygulanmış topraklardaki kolay okside olabilen organik karbon %'sinin

inkübasyon süresince değişimi (K:arıtma çamuru uygulanmamış kontrol toprağı, AÇ1:evsel arıtma çamuru, AÇ2:maya endüstrisi arıtma çamuru, AÇ3:konserve gıda endüstrisi arıtma çamuru)

AÇ1:evsel arıtma çamuru, AÇ2:maya endüstrisi arıtma çamuru, AÇ3:konserve gıda endüstrisi arıtma çamuru)

Diğer arıtma çamurlarına göre daha düşük organik karbon içeriğine sahip olan maya endüstrisi kaynaklı arıtma çamuru uygulamasında, toprakların organik karbon içeriğindeki artış da daha az olmuştur. Tarım topraklarındaki organik maddenin yetersiz oluşu, Türkiye de dahil olmak üzere Akdeniz iklimi görülen bölgelerde ciddi bir problem olarak kabul edilmektedir. Zira bu bölgelerde yaz aylarındaki yüksek sıcaklıklar organik maddenin yıllık mineralizasyon oranını arttırmaktadır. Türkiye’de özellikle Doğu Anadolu Bölgesi’nde topraklar, yüksek kireç ve düşük organik madde içeriğiyle karakterize edilmekte olup (Bozkurt vd. 2010), arıtma çamuru uygulamasının bu tür topraklarda minimal riskle organik madde içeriğini arttırabileceği diğer çalışmalarda da vurgulanmıştır (Antolin *et al.* 2005, Garcia-Gill 2004).

Arıtma çamuru uygulanmış topraklardaki amonyum ve nitrat azotu parametrelerinin inkübasyon süresince değişimi ise Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. Arıtma çamuru uygulanmış topraklardaki amonyum ve nitrat azotu konsantrasyonlarının inkübasyon süresince değişimi (K:arıtma çamuru uygulanmamış kontrol toprağı,

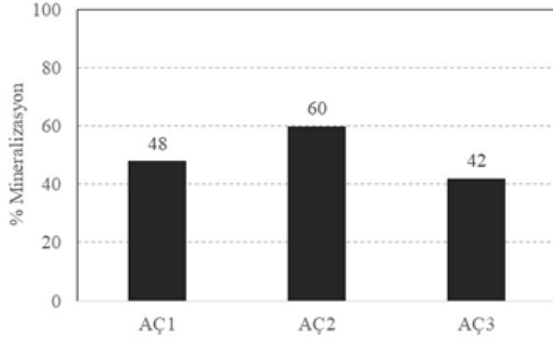
Çamur uygulanmış ve uygulanmamış topraklardaki amonyum azotuna ilişkin değerler incelendiğinde, inkübasyon süresince kontrol topraklarındaki amonyum azotu değerlerinin 37-66 mg/kg arasında salındığı, çamur uygulanmış topraklarda ise bu değerlerin 36 ila 93 mg/kg arasında olduğu tespit edilmiştir.

Çamur uygulanmış topraklarda amonyum azotu değerlerinin kontrole göre çok büyük artış göstermemesi, topraktaki amonifikasyon prosesinin baskın olmadığını veya amonifikasyon sonrası meydana gelen amonyum azotunun immobilize olduğunu veya hızla nitrat azotuna dönüşmüş olabileceğini göstermektedir. Inkübasyon süresince takip edilen yüksek nitrat azotu değerleri, inkübasyon şartlarında amonifikasyon prosesinin baskılanmadığını, mineralizasyonla salınan amonyum azotunun hızlıca nitrat azotuna dönüştüğünü göstermektedir (Şekil 3). Nitrifikasyon için optimum pH değeri 6,6 ile 8 arasında olup, inkübasyon süresi boyunca topraklardaki pH değerleri bu aralıkta kalmıştır. pH’ı 6’nın altında olan tarım topraklarında nitrifikasyon hızının azaldığı, pH 4.5’un altında ise ihmal edilebilir seviyelere düştüğü bilinmektedir (Paul and Clark 1996). Yürütülen çalışmada çamur uygulanmış topraklardaki nitrat azotu değerleri zamana bağlı belirgin bir artış göstermiş ve 12 aylık inkübasyon döneminin sonunda 713 ila 1048 mg/kg seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 3). Arıtma çamurlarının toprağı uygulanmasıyla toprakta büyük bir nitrat birikiminin meydana geldiğinin vurgulandığı çok sayıda çalışma mevcuttur (Luczkiewicz 2006, Antoniadis *et al.* 2010, Samaras *et al.* 2008). Ancak yürütülen inkübasyon çalışması kapsamında gözlenen nitrat birikiminin doğal şartlarda bu boyutta olması beklenmemektedir. Şüphesiz doğal ortamdaki iklim olaylarına bağlı değişimler sonucu bu düzeyde bir nitrat birikimi meydana gelmeyecektir. Öte yandan çeşitli toprak canlılarının ve bitkilerin mineral azot formlarını kullanıyor olması bu birikimin daha da az olmasını sağlayacaktır.

Yapılan çamur uygulamasıyla toprağı giren ve toprakta halihazırda bulunan organik azot değerleri ile inkübasyon süresince ölçülen inorganik azot değerleri dikkate alınarak çamur organik maddesinin mineralizasyon oranları da hesaplanmış ve Şekil 4’te sunulmuştur. Yapılan hesaplamalarda

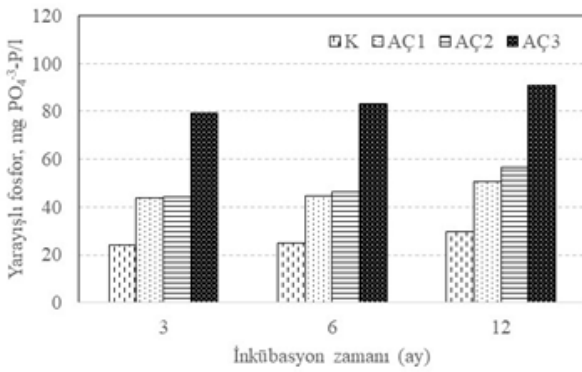
inkübasyon süresince gerçekleşebilecek amonyak kayıplarının ihmal edilebilir seviyede olduğu kabulü yapılmıştır.

Şekil 4'ten görüldüğü gibi, arıtma çamuru uygulamasıyla toprağa verilen organik azotun AÇ1, AÇ2 ve AÇ3 çamurları için sırasıyla %48, %60 ve %42'si 12 aylık inkübasyon süresi boyunca mineralize olmuştur. Toplam azot içeriği çalışmada kullanılan diğer çamurlarınkinin yarısı kadar olan maya endüstrisi çamurundaki (AÇ2) organik azotun diğer çamurlara nazaran daha hızlı mineralize olması dikkat çekicidir. Bu sonuç, arıtma çamurlarının özelliklerine bakarak, toprak üzerindeki etkileri konusunda yorumda bulunmanın tek başına yeterli olmadığını göstermektedir.



Şekil 4. Arıtma çamuru uygulanmış topraklardaki çamur kaynaklı organik azotun 12. Ay sonundaki mineralizasyon yüzdeleri (AÇ1:evsel arıtma çamuru, AÇ2:maya endüstrisi arıtma çamuru, AÇ3:konserve gıda endüstrisi arıtma çamuru).

Şekil 5. arıtma çamuru uygulanmış topraklardaki yarıyıllık fosfor konsantrasyonlarında inkübasyon süresince meydana gelen değişimi göstermektedir.



Şekil 5. Arıtma çamuru uygulanmış topraklardaki yarıyıllık fosfor konsantrasyonlarının inkübasyon süresince değişimi (K:arıtma çamuru uygulanmamış kontrol toprağı, AÇ1:evsel arıtma çamuru, AÇ2:maya

endüstrisi arıtma çamuru, AÇ3:konserve gıda endüstrisi arıtma çamuru)

Yapılan tüm çamur uygulamaları, yarıyıllık fosfor konsantrasyonlarını kontrole göre belirgin şekilde arttırmıştır. Konserve gıda endüstrisi orijinli arıtma çamuru (AÇ3) uygulanan topraklarda meydana gelen artış daha yüksek olmuştur. Diğer arıtma çamurlarına göre daha düşük toplam fosfor içeriğine sahip AÇ3 arıtma çamuru uygulamalarında tüm inkübasyon dönemlerinde daha yüksek yarıyıllık fosfor konsantrasyonlarının belirlenmesi dikkat çekicidir. 12 aylık inkübasyon sonunda AÇ1 ve AÇ2 çamuru uygulamalarındaki yarıyıllık fosfor konsantrasyonları 50-55 mg PO₄-P / kg kuru toprak seviyelerinde iken, AÇ3 çamurunun uygulandığı topraklarda bu değer yaklaşık olarak 100 mg PO₄-P / kg olarak bulunmuştur.

4. Sonuç

Yapılan araştırma sonuçlarına göre, toprağa 100 t/ha oranında uygulanan evsel ve evsel nitelikli arıtma çamurları, 12 aylık inkübasyonun ardından, toprakların pH değerini hafifçe düşürürken (maksimum 1 birim), EC değerlerini belirgin şekilde arttırmıştır. Toprağa yapılan tüm arıtma çamuru uygulamalarının, kontrol toprağında yaklaşık %1,6 seviyelerindeki kolay okside olabilir organik karbon içeriğini %2 ila 2,55 seviyelerine çıkarttığı tespit edilmiştir. Çamur uygulanmış topraklarda amonyum azotu değerleri kontrole göre çok büyük artış göstermezken nitrat azotu değerleri belirgin şekilde artmış ve 12 aylık inkübasyon döneminin sonunda 713 ila 1048 mg/kg seviyelerine ulaşmıştır. Yürütülen çalışma kapsamında, nitrifikasyon prosesinin yapılan uygulamalarla inhibe olmadığı, amonifikasyonu takiben açığa çıkan amonyum azotunun hızla nitrat azotuna dönüştüğü izlenimi edinilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan evsel ve evsel nitelikli gıda endüstrisi kökenli arıtma çamurlarındaki organik azotun, 12 aylık inkübasyon sonunda %48 ila 60 oranında mineralize olduğu görülmüştür. Yarıyıllık fosfor konsantrasyonunun da çamur uygulamasına bağlı olarak 24-30 mg PO₄-P/kg seviyelerinden 44-91 mg PO₄-P/kg seviyelerine çıktığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, 100 t/ha

oranında yapılan evsel ve evsel nitelikli arıtma çamuru uygulamaları ile toprağın organik madde ve bitki besin maddesi içeriklerinin arttığı ve topraktaki biyokimyasal fonksiyonların geliştiği izlenimi edinilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen parametreler itibarıyla denenen arıtma çamurlarının toprak düzenleyici olarak kullanım potansiyelinin oldukça yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

- Antolin, M.C., Pascual, I., Garcia, C., Polo, A. and Sanhez-Diaz, M., 2005. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Fields Crops Research*, **94**, 224-237.
- Antoniadis, V., Tsadilas, C.D. and Dalias, P., 2010. Evaluation of sewage sludge as a soil amendment in relation to nitrate leaching. *Agrochimica -Pisa-*, **54**, 91-102.
- APHA, AWWA and WEF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20. Edition, American Public Health Association.
- Bozkurt, M.A., Yarılgaç, T. and Yazıcı, A., 2010. The use of sewage sludge as an organic matter source in apple trees. *Polish Journal of Environmental Studies*, **19**, 267-274.
- Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S., 1982. "Nitrogen-total" in Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties (A.L. Page, ed.), SSSA Book Series No: 9, SSSA and ASA, 595-622.
- Gabrielle, B., Da-Silveira, J., Houot, S., Michelin, J., 2005. Field-scale modelling of carbon and nitrogen dynamics in soils amended with urban waste composts. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **110**, 289-299.
- Garcia-Gill, J.C., Plaza, C., Senesi, N., Brunetti, G. and Polo, A., 2004. Effects of sewage sludge amendment of humic acids and microbiological properties of semiarid Mediterranean soil. *Biology and Fertility of Soils*, **39**, 320-328.
- Gaskin, J.W., Brobst, R.B., Miller, W.P. and Tollner, E.W., 2003. Long-term biosolids application effects on metal concentrations in soil and bermudagrass forage. *Journal of Environmental Quality*, **32**, 146-152.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1982. "Particle Size Analysis" in Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods (A. Klute, ed.), ASA-SSSA, 384-412.
- Ghazy, M., Dochorn, T., and Dichtl, N., 2009. Sewage sludge management in Egypt: Current status and perspectives towards a sustainable agricultural use. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, **3**, 270-278.
- Keeney, D.R. and Nelson, D.W., 1982. "Nitrogen-inorganic Forms" in Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties (A.L. Page, ed.), SSSA Book Series No: 9, SSSA and ASA, 643-693.
- Krogstad, T., Sogn, T.A., Asdal, A. and Sæbø, A., 2005. Influence of chemically and biologically stabilized sewage sludge on plant-available phosphorous in soil. *Ecological Engineering*, **25**, 51-60.
- Kumar, V., Chopra, A.K. and Kumar, A., 2017. A review on sewage sludge (Biosolids) a resource for sustainable agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, **2**, 340-347.
- Luczkiewicz, A., 2006. Soil and groundwater contamination as a result of sewage sludge land application. *Polish Journal of Environmental Studies*, **15**, 869-876.
- Mazen, A., Faheed, F.A. and Ahmed, A.F., 2010. Study of potential impacts of using sewage sludge in the amendment of desert reclaimed soil on wheat and jews mallow plants. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, **53**, 917-930.
- Mc Lean, E.O., 1982. "Soil pH and Lime Requirement" in Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties (A.L. Page, ed.), SSSA Book Series No: 9, SSSA and ASA, 199-224.
- Mohammad, M.J. and Athamneh, M.B., 2004. Changes in soil fertility and plant uptake of nutrients and heavy metals in response to sewage sludge application to calcareous soils. *Journal of Agronomy*, **3**, 229-236.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1982. "Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter", In: Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties, SSSA Book Series No: 9, SSSA and ASA, 539-579.
- Nikzad, E., Kalbasi, M., Hoodaji, M. and Fallahzade, J., 2015. Effect of sewage sludge urban application on concentration of Fe, Mn and some nutrient element in parsley. *Research Journal of Soil Biology*, **7**, 46-55.

- Olsen, S.R. and Sommers, L.E., 1982. "Phosphorus" in Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties (A.L. Page, ed.), SSSA Book Series No: 9, SSSA and ASA, 403-430.
- Paul, E.A. and Clark, F.E., 1996. Soil Microbiology and Biochemistry, 2nd edn, San Diego Academic Press Inc.
- Pepper, I.L., Zorzghi, H.G., Bengson, S.A., Iker, B.C., Banerjee, M.J. and Brooks, J.P., 2012. Bacterial populations within copper mine tailings: long-term effects of amendment with Class A biosolids. *Journal of Applied Microbiology*, **113**, 569-577.
- Rhoades, J.D., 1982. "Soluble Salts" in Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties, (A.L. Page, ed.), SSSA Book Series No: 9, SSSA and ASA, 285-290.
- Samaras, V., Tsadilas, C. D. and Stamatiadis, S., 2008. Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield, and nitrate leaching. *Agronomy Journal*, **100**, 477-483.
- Sepúlveda-Varas, A., Inostroza, C. And Encina-Montoya, F., 2011. Effects of the incorporation of biosolids on soil quality: temporal evolution in a degraded inceptisol (typic endoaquepts). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **11**, 33-44.
- Sharma, B., Sarkar, A., Singh, P. and Singh, R.P., 2017. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. *Waste Management*, **64**, 117-132.
- Sidhu, J.P. and Toze, S.G., 2009. Human pathogens and their indicators in biosolids: a literature review. *Environment International*, **35**, 187-201.
- Silva, J.D.C., Tamara Leal, T.T.B., Araújo, A.S.F., Araujo, R.M. Gomes, R.L.F., Melo, W.J. and Singh, R.P., 2010. Effect of different tannery sludge compost amendment rates on growth, biomass accumulation and yield responses of Capsicum plants. *Waste Management*, **30**, 1976-1980.
- Singh, R.P. and Agrawal, M., 2010. Biochemical and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) grown on different sewage sludge amendments rates. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **84**, 606-612.
- Ünal, M., 2002. Gıda sanayii arıtma çamurlarının tarımda kullanılma olanakları üzerine bir araştırma. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 110.
- Walker, D.J. and Bernal, M.P., 2008. The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource Technology*, **99**, 396-403.
- Yaman, K. ve Olhan, E., 2011. Arıtma çamuru kullanımının buğdayın verim, fiziki girdi ve maliyetleri üzerindeki etkisi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, **17**, 157-166.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045501 (598-612)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045501 (598-612)

DOI: 10.35414/akufemubid.746252

Araştırma Makalesi / Research Article

Global ve Bölgesel (Yüksek Çözünürlüklü) Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Analizi Üzerine Bir İnceleme

Bihter EROL^{1*}, Mustafa Serkan IŞIK¹, Serdar EROL¹¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.Sorumlu yazar e-posta: *bihter@itu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0854-788X>e-posta: isikm@itu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1769-4451>e-posta: erol@itu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7100-8267>

Geliş Tarihi: 01.06.2020

Kabul Tarihi: 25.08.2020

Öz

Topografik yükseklikler birçok mühendislik uygulamasında ve yerbilimlerine ilişkin araştırmalarda kullanılmaktadır. Yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM), günümüzde yükseklik verilerini elde etmenin en pratik ve ekonomik yoludur. SYM'lerinin üretiminde farklı yöntemler uygulanır. Bu modeller çeşitli hata kaynaklarından etkilenirler. Bu nedenle, SYM verilerini kullanmadan önce çalışma alanlarındaki performanslarını test etmek çalışmada gereksinim duyulan yükseklik doğruluğunun sağlanması için önemlidir. Genel bir yaklaşım olarak, Sayısal Yükseklik Modellerinin doğruluk analizinde topografyaya uygun dağılmış kontrol noktalarında Global Navigation Satellite System (GNSS) ve/veya nivelman yükseklikleri ile modelden elde edilen yükseklik farklarının karesel ortalama hata (k.o.h.) değerleri dikkate alınır. Bu çalışmada, yüksek çözünürlüklü global SYM'leri: ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Gelişmiş Uzay Kaynaklı Termal Emisyon ve Yansıma Radyometresi), SRTM (Shuttle Radar Topography Mission-Mekik Radar Topografya Misyonu) ile bölgesel HGM DTED2 modellerinin doğrulukları GNSS/nivelman verileri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu amaçla farklı topografik özellikteki alanları temsil eden üç ayrı GNSS/nivelman veri seti kullanılarak kontrol noktalarının dağılımının yanı sıra test alanı topografyasının SYM doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Türkiye'nin kuzeybatısındaki test edilen global ve bölgesel SYM'lerinin doğruluğunu topografyanın değişen özelliklerine bağlı olarak karşılaştırmakta ve değerlendirmektedir. Testler sonucu global SYM'lerinin doğruluğu ~8.0 m iken bölgesel DTED2 SYM doğruluğu ~6.0 m olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM); ASTER; SRTM; GNSS/Nivelman; EGM96; Doğruluk analizi

An Investigation on Accuracy Analysis of Global and Regional (High Resolution) Digital Elevation Models

Abstract

The topographical heights are required in practice for a number of engineering applications as well as their specific use in many Earth science disciplines. Using a high-resolution Digital Elevation Model (DEM) is the most practical and economical way for obtaining the height data nowadays. These models include errors. So, it is important to clarify the quality as well as the accuracy of the DEM in the study areas before using its data. In general, validating DEMs using independent point-wise data such as GNSS and leveling heights provide an overall accuracy measure in terms of root means square error (r.m.s.e.) of the DEM derived heights. In this study three high-resolution digital elevation models ASTER, SRTM and Turkey Digital Topographic Data (DTED2) in 1" and 3" resolutions are assessed using GNSS/leveling data. Using three different sets of GNSS/leveling data invalidations it is aimed to clarify the role of the distribution of the ground-control points as well as the region's characteristics, such as roughness of topography, land-cover, etc., in the validation results. The conclusions report the accuracy of the validated DEMs in northwest Turkey and hence include a categorization of DEM performances, generated from remotely sensed data and terrestrial techniques, depending on the topographical characteristics. In the test results the accuracies for global DTMs is ~8.0 m, and for regional DTED2 DEM is ~6.0 m.

Keywords

Digital Elevation Model (DEM); ASTER; SRTM; GNSS/Leveling; EGM96; Accuracy analysis

1. Giriş

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verilerinden elde edilen topografik yükseklikler birçok mühendislik ve yer bilimleri disiplinlerine ilişkin araştırma ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Sayısal Yükseklik Modeli bir arazi yüzeyinin üç boyutlu modelini ifade eder ve araziye ait yükseklik verilerinden elde edilir (Hirt 2016, Maune and Nayegandhi 2019). Noktalara ilişkin elde edilen yükseklik verileri ile farklı amaçlara yönelik tasarım, analiz, modelleme ve planlama faaliyetleri gerçekleştirilir. Literatürde SYM terimi: yeryüzünün fiziksel yüzeyinin (çıplak topografyanın) yükseklik bilgilerini ifade eden Sayısal Arazi Modeli ve bitki örtüsü, topografya üzerine inşa edilmiş yapay objelere ilişkin yükseklik bilgisini de içeren Sayısal Yüzey Modeli kavramlarını birlikte tarif eder (Varga and Bašić 2013, Hirt 2016). Sayısal Yüzey Modelleri daha çok şehir bölge planlama, peyzaj çalışmaları, görünürlük analizi gibi çalışmalara altlık oluşturur. Sayısal Arazi Modelleri ise çoğunlukla salt topografyanın fiziksel yükseklik bilgisini gerektiren taşkın ve drenaj modelleme, jeolojik araştırmalar, gravite indirgemesi gibi alanlara katkı sağlar. Bu çalışmada değerlendirilen modeller Sayısal Arazi Modeli terimi ile tarif edilseler de çalışma içeriğinde genel terim olarak SYM ifadesi tercih edilmektedir. Bir Sayısal Yükseklik Modeline ilişkin topografik yükseklik verileri raster (grid formda yükseklik haritaları) veya vektör (düzensiz üçgenler ağı (triangulated irregular network-TIN) ile eş yükseklik eğrileri) formatta kullanıcılara servis edilebilir. Verinin pratik kullanımı ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen çoğu uygulama ve hesaplamalarda verimlilik sağlaması sebebiyle grid format SYM verilerinin servis edilmesinde genellikle tercih edilmektedir (Maune and Nayegandhi 2019). Sayısal Yükseklik Modellerinin üretilmesinde kullanılan yükseklik verileri farklı ölçme teknikleri kullanılarak elde edilir. Yersel ve uydulara dayalı ölçme teknikleri (total station, takeometre, GNSS, yersel lazer tarayıcılar vb.), hava fotogrametrisi, LiDAR, radar altimetresi ve interferometrik yapay açıklıklı radar (InSAR) ölçmeleri SYM üretiminde kullanılan tekniklerdir. Günümüzde özellikle uzaktan algılama yöntemleri ile elde edilen yüksek

çözünürlüklü (~1") yaklaşık global kapsamda SYM verileri kullanıcılar tarafından çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu modellerin yersel ve havadan ölçme yöntemleri ile elde edilen modellere tercih edilmelerinin başlıca nedenleri arasında son yıllarda anlamlı şekilde iyileşen veri doğrulukları, birçok çalışma için yeterli çözünürlükte ve geniş alanlarda geçerli olmaları ve ücretsiz servis edilmeleri gelmektedir. Yeryüzünde erişimi zor bölgelere (örn. çöller, kutup bölgeleri, sık ormanlık alanlar gibi) ilişkin de veri sağlamaları tercih edilmelerinin diğer bir sebebi olarak belirtilebilir. Yüksek çözünürlüklü global SYM'lerin yanı sıra ülke bazında yersel ve hava ölçmelerinden üretilmiş 1:25K ölçekli topografik haritaların sayısallaştırılması ile elde edilen SYM'ler de çok çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar (Mukherjee *et al.* 2013, Bildirici ve Abbak 2020).

Sayısal Yükseklik Modellerinden elde edilen yükseklikler ve bu yükseklikler kullanılarak belirlenen jeomorfolojik parametreler çevre ve yer bilimleri alanlarında ve birçok mühendislik uygulamasında kullanılır (Hirt *et al.* 2010, Mouratidis *et al.* 2017). Bu çalışmalardan bazıları; hidroloji ve arazi hareketleri için su akış modellemesi, drenaj ağları, taşkın simülasyonu ve modellemesi, arazi kullanımı planlaması, üç boyutlu uçuş planlaması, uydu görüntülerinin ve hava fotoğraflarının ortorektifikasyonu, görüş ve bakı analizleri, gravite ölçülerinin redüksiyonu, mühendislik ve altyapı çalışmaları, akıllı taşıma sistemleri, arkeoloji, iklim çalışmalarıdır (Mukherjee *et al.* 2013, Maune and Nayegandhi 2019).

Kullanım alanına göre gereksinim duyulan yükseklik doğruluğu farklılık gösterir. Bu kapsamda amaca uygun SYM'nin seçilmesi, kullanılacak modelin çalışma alanındaki doğruluğunun önceden test edilmesi ve belirlenmesi önemlidir (Wechsler 2003, Işık *et al.* 2017). Uzaktan algılama verilerinden elde edilen global SYM verilerinin doğruluklarının test edilmesinde farklı istatistiksel yaklaşımlar kullanılabilir (Yap *et al.* 2019). Bunlar arasında en sık kullanılan yöntem sayısal modelden kontrol noktalarına enterpole edilen yükseklik bilgisinin yersel ve uydu bazlı konumlama tekniklerinden elde

edilen yükseklikler ile karşılaştırılmasıdır (Varga and Bašić 2015).

Bir SYM'nin doğruluğunu ve kalitesini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunların başında modelin oluşturulmasında kullanılan ölçme yöntemi ve ölçü kalitesi gelmektedir. Uzaktan algılama tekniği ile üretilen SYM verilerinde ölçme tekniğinin etkilendiği fiziksel faktörlerden dolayı yer yer veri boşlukları oluşmaktadır. Ülkemizde böylesi modellerin onarılmasına ve boşlukların giderilmesine yönelik bir proje çalışması Bildirici ve Abbak (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. SYM'nin doğruluğunu etkileyen diğer faktörler modelin mekânsal çözünürlüğü, grid veri formatının hazırlanmasında kullanılan interpolasyon yöntemi, çalışma alanının topografik karakteridir. Modellerin doğrulukları yatay ve düşeyde ifade edilse de bu iki bileşeni birbirinden ayrı düşünmek sağlıklı olmaz (Mukherjee *et al.* 2013).

Bu çalışmada uzaktan algılama verilerinden elde edilen 1" (~30 m) ve 3" (~90 m) çözünürlüklerde servis edilmiş global ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) ve SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) modelleri ile Harita Genel Müdürlüğünden satın alınan 1:25K ölçekli topografik haritaların sayısallaştırılması ile üretilmiş 1" çözünürlüklü DTED2 verilerinin doğrulukları Türkiye'nin kuzey batısında yaklaşık 3°x4° büyüklüğündeki çalışma bölgesinde test edilmektedir. Gerçekleştirilen testler üç ayrı GNSS/nivelman veri setine ait noktaların ortometrik ve GNSS-elipsoidal yükseklikleri (EGM96 geoid modeli ile dönüştürüldükten sonra) kullanılarak tekrarlanmıştır. Aynı çalışma alanında üç farklı veri seti ile testlerin yinelenmesinin nedeni bölge topografik karakterinin ve kontrol nokta dağılımının test sonuçlarındaki rolünü saptamak amacıyla kaynaklanmaktadır.

İlerleyen bölümlerde kullanılan sayısal yükseklik modelleri ve GNSS/nivelman veri grupları tanıtarak, testlerin gerçekleştirilmesinde uygulanan yöntem anlatılmaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlar üçüncü bölümde verilmekte, sonuçlara ilişkin yorumlar ve çıkarımlar dördüncü bölümde açıklanmaktadır.

2. Veri ve Yöntemler

Yersel yöntemlerin kısıtlarına bağlı olarak geçmişte yalnızca sınırlı bir alanda ya da ülke ölçeğinde üretilen sayısal yükseklik modelleri son yıllarda uzaktan algılama tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak tüm yeryuvarı için global ölçekte üretilmektedir. Bir çok veri sağlayıcı merkezden ücretsiz olarak kullanıcılara sunulan global sayısal yükseklik modelleri oldukça fazla sayıda ve güncellenen versiyonları ile karşımıza çıkmaktadır (Int Kyn. 1, Int Kyn. 2). Bu çalışma kapsamında 1" ve 3" çözünürlükleri ile sunulan Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (Int Kyn. 3) ve Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Int Kyn. 4) SYM'leri ile Türkiye için bölgesel 1" çözünürlüklü HGM-DTED2 (Int Kyn. 5) modelleri değerlendirilmektedir. Önceki yıllarda Bildirici ve Abbak (2017) Türkiye genelinde her üç modeli birbirleri ile kıyaslayan bir çalışma gerçekleştirmiş, sonucunda SRTM verilerinin Türkiye bölgesel SYM verileri ile daha uyumlu olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Bildirici ve Abbak (2020) SRTM 1" verilerini Türkiye'nin kuzey doğu ve güneyinde iki bölgede, bölgesel SYM verilerinden yararlanarak datum farklarını giderdikten sonra diferansiyel GNSS ölçmelerinden elde edilen veriler bir geoid modeli (EGM96) kullanarak test etmiş, SRTM modelinin ülkemizde, rapor edilen global doğruluğundan daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Burada verilen çalışmanın yukarıda saymış olduğumuz yayınlanmış araştırmalardan farkı modellerin Türkiye'nin kuzey batısında farklı topografik karaktere sahip bölgelerdeki test verileri ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarını sunmasıdır.

2.1 ASTER GDEM

ASTER global SYM (ASTER Global Digital Elevation Map – GDEM) Japonya Ekonomi, Ticaret ve Endüstri Bakanlığı (METI) ile Birleşik Devletler Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından gerçekleştirilen ortak bir projenin ürünü olarak yayınlanmıştır. ASTER GDEM modelinin ilk sürümü Haziran 2009 tarihinde kullanıcılara sunulmuştur. Modelin hesaplanmasında NASA Yer İzleme Sisteminin (Eath

Observing System-EOS) Terra uydusu üzerinde bulunan ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emmission and Reflection Radiometer) algılayıcısından elde edilen stereo-çift uydu görüntülerinin değerlendirilmesi ile elde edilmiştir (Sümer vd. 2006, Int Kyn. 3). ASTER GDEM 83°K-83°G enlemleri arasında kalan bölgeyi kapsar. Söz konusu bölgede yeryuvarı kara kütesinin %99'luk bir kısmını modellemiş olur. Son olarak 5 Ağustos 2019 tarihi itibarıyla modelin üçüncü sürümü (GDEM V3) kullanıcılara sunulmuştur. Üçüncü sürüm ile yayınlanan okyanus, nehir ve gölleri de içeren ASTER su kütesi veri seti de (ASTER Water Body Dataset-ASTWBD) hidrografik çalışmalarda kullanılmak üzere sunulan ürünler arasında yer almaktadır.

ASTER GDEM V3'de değerlendirmeye dâhil edilen ilave stereo (çift) görüntüler ile modelin kapsama alanı genişletilerek veriden kaynaklı bozukluklar ve yapay etkiler daha gelişmiş bir işleme algoritması ile giderilmiştir. Yine uygulanan gelişmiş üretim algoritması ile üçüncü sürümde modelin mekânsal çözünürlüğü, yatay ve yükseklik doğrulukları iyileştirilmiştir. ASTER GDEM GeoTIFF formatında 1°x1°'lik paftalar halinde 30 m grid aralıklı olarak kullanıcılara bedelsiz servis edilir (Int Kyn. 3). Servis edilen modellerin yatay ve düşey datum bilgileri, mekânsal çözünürlükleri Çizelge.1'de verilmektedir. ASTER GDEM global SYM sürümlerinin kalite ve doğrulukları Birleşik Devletler ve Japonya liderliğinde kurulmuş 20 üyenin katkı verdiği ASTER değerlendirme çalışma grubu tarafından değerlendirilerek rapor edilir (Tachikawa *et al.* 2011). Çalışma grubunun yayınlamış olduğu 31 Ağustos 2011 tarihli raporda modelin birinci ve ikinci sürümleri çeşitli veri grupları kullanılarak test edilmiş, gerçekleştirilen testler neticesinde GDEM V1'in mutlak düşey doğruluğu yaklaşık 20 m (%95 güven aralığında), GDEM V2 sürümünün mutlak düşey doğruluğu 17 m (%95 güven aralığında) olarak bildirilmiştir (Tachikawa *et al.* 2011). İlgili güven aralığında lineer hata biriminde (L95) belirtilen mutlak doğruluklara karşılık gelen karesel ortalama hatalar (k.o.h.) ise V1 ve V2 için sırasıyla 10.20 m ve 8.67 m'ye karşılık gelmektedir (L95=k.o.h.x1.960) (Mukul *et al.* 2017). Aynı raporda veri değerlendirme ve model üretme algoritmalarındaki

gelişmeler neticesinde yüksek enlemlerde stereo görüntü eksiliği, bulut kirliliği, sulak alanların uygun maskelenememesi ve benzer sebeplerden GDEM V1 sürümündeki çoğu veri boşluklarının ve suni etkilerin GDEM V2 sürümünde anlamlı şekilde giderilmiş olduğu bildirilmiştir. GDEM V3 için hâlihazırda yayınlanmış bir değerlendirme raporu mevcut değildir.

ASTER GDEM SYM'li için atıf edilen raporda verilen değerlendirmeler dışında literatürde modelin yükseklik doğruluğunu bölgesel olarak analiz eden çok sayıda yayın mevcuttur. Bunlar arasında Gesch *et al.* (2016) ASTER SYM'ni Birleşik Devletler ulusal jeodezi dairesi (U.S. National Geodetic Survey) temel jeodezik ağına ait 23 000 kontrol noktasında test etmiş, GDEM V2 ve GDEM V3 sürümlerinin çalışma bölgesindeki düşey doğruluklarını sırasıyla 8.68 m ve 8.52 m olarak yayınlamıştır.

2.2 SRTM

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission-Mekik Radar Topografya Görevi) yeryüzünün yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelinin oluşturulması amacı ile Birleşik Devletler Ulusal Görüntüleme ve Haritalama Dairesi (US National Geospatial Intelligence Agency - NIMA), Ulusal Havacılık ve Uzay Ajansı (NASA), Alman Havacılık Uzay Merkezi (DLR) ve İtalyan Uzay Ajansı (ASI) ortaklığında gerçekleştirilmiş uluslararası bir projedir (Int Kyn. 6, Int Kyn. 7, Int Kyn. 8). SRTM SYM verileri 60°N-56°S enlemleri arasında kalan bölgeyi kapsar ve haritalanan bölge yeryuvarının kara kütesinin yaklaşık %80'ine karşılık gelmektedir. SRTM sayısal yükseklik modeli, Endeavour uzay mekiğinin taşıdığı geliştirilmiş radar sistemi ile Şubat 2000'de gerçekleştirilen 11 günlük uçuşundan elde edilen interferometrik yapay açıklıklı radar (interferometric synthetic aperture radar-InSAR) verilerinin değerlendirilmesi ile üretilmiştir. Verilerin elde edilmesinde uzay aracı C- ve X-bantlarda algılama yapan iki algılayıcı ile donatılmıştır ve tek geçişli InSAR tekniği uygulanmıştır (Farr *et al.* 2007).

ASTER verilerinin aksine bulutluluk oranı ve benzeri meteorolojik koşullar SRTM verilerini etkilememektedir. Ancak bunun dışında radar

sinyalinden kaynaklı saçılma, yansıma, gölgeleme gibi etkiler SRTM ölçmelerinden üretilen SYM verilerinde boşluklara sebebiyet vermektedir. Bu etkiler ağırlıklı olarak yoğun bitki örtüsü ile kaplı ormanlık alanlarda, sakin su kütlesine rastlayan körfez, göl vb. bölgelerde daha yoğun olarak görülmektedir. SRTM verilerinden üretilen SYM'nin ilk sürümünde oldukça büyük oranda mevcut olan bu boşluklar interpolasyon algoritmaları ya da diğer kaynaklardan gelen veriler ile doldurularak üst sürümler üretilmiştir (Luedeling *et al.* 2007, Yue *et al.* 2017). Türkiye'de de bölgesel olarak SRTM SYM verilerindeki boşlukların onarılması ve 1:25K topografik haritalardan üretilen DTED2 verileri ile uygun şekilde doldurulmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır (Bildirici vd. 2009, Bildirici ve Abbak 2020). SRTM SYM'lerinin güncel sürümlerinde veri boşluklarının global olarak giderilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve büyük oranda da başarı sağlanmıştır.

SRTM SYM'leri C-bant verileri ile hesaplanan 3" (~90 m) çözünürlükte ve X-bant verileri ile hesaplanan 1" (~30 m) çözünürlükte servis edilmektedir. SRTM3 (~90 m) C-bant modelleri V1, V2, V3 ve V4 olmak üzere dört temel (Mouratidis *et al.* 2010) ve Uluslararası Tarım Danışma Grubu Mekânsal Bilgi Araştırma Konsorsiyumu (Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information-CGIAR-CSI) Int Kyn. (9) tarafından yayınlanan V4.1 olmak üzere beş farklı sürüm ile kullanıcılara sunulmuştur (Mukul *et al.* 2015). SRTM1 (~30 m) X-bant modeli de yeryuvarının büyük bir bölümünü kapsayacak şekilde 2015 yılından bu yana farklı veri merkezleri tarafından kullanıcılara bedelsiz olarak sağlanmaktadır (Int Kayn. 1, Int Kayn. 6). Bu çalışma kapsamında SRTM SYM C-bant dördüncü sürüm ile X-bant modelleri test edilmiştir. Test edilen modellere ilişkin temel tanımlar Çizelge.1 de özetlenmektedir.

SRTM verilerinden hesaplanan SYM'ine ilişkin öngörülen ve bildirilen mutlak düşey doğruluk yaklaşık 16 m dir (%90 güven aralığında) (Mukul *et al.* 2015). İlgili güven aralığında lineer hata biriminde (L90) belirtilen bu mutlak doğruluğa karşılık gelen karesel ortalama hata ise 9.72 m dir (L90 = k.o.h. x 1.6449).

SRTM SYM'lerinin doğruluğunu global ve bölgesel olarak analiz eden bir çok çalışma yayınlanmıştır. Bunlar arasında Uluslararası GNSS Ağı (International GNSS Service - IGS) noktaları kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada C- ve X-bant modellerinin kıtalar özelinde doğrulukları değerlendirilmiştir. Buna göre; Afrika, Avusturalya ve Kuzey Amerika'da elde edilen test sonuçlarında SRTM modellerin global olarak hedeflenen doğruluğu (~10 m k.o.h.) teyit ettikleri görülmüştür. Ancak Asya, Avrupa ve Güney Amerika kıtalarında elde edilen analiz sonuçlarında C- ve X- bant modelleri için yakın doğruluk değerleri bulunmuş olup (~11.5 m k.o.h.) söz konusu doğrulukların vaat edilen SRTM SYM (~9.72 m k.o.h.) doğruluğundan daha düşük olduğu gözlenmiştir (Mukul *et al.* 2015). Kolecka ve Kozak (2014) ve Agrawal *et al.* (2006) SRTM modellerinin doğruluğunu topografyanın artan yüksekliğine, eğimine ve orman bitki örtüsü yoğunluğuna bağlı olarak analiz etmişlerdir. Kolecka and Kozak (2014) tarafından Polonya'da gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar SRTM SYM'nin yükseklik doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerin, C-bant modellerde veri boşluklarının ve yüksek eğim açılarının dağılımı, X-bant modellerde ise lokal geliş açısı, eğim, yön ve radar ışını geometrisi olduğunu bildirmektedir. Bunun yanı sıra her iki modelde orman bitki örtüsünün modelden elde edilen yüksekliklerin ortalama hatalarını ~10 metreye kadar arttırabildiği değerlendirilmiştir.

Hindistan'da gerçekleştirilen bir araştırmada SRTM SYM'nin yükseklik doğruluğunu topografyanın karakteristik özellikler ve engebeli yapısı ile ilişkilendirmiştir (Agrawal *et al.* 2006, Mukul *et al.* 2017). Buna göre SRTM C-bant SYM yükseklik doğrulukları topografyanın düzlüklerinde (maksimum yükseklik değişimi ~40 m) 3.55 m, orta engebeli bölgelerde (yükseklik değişimi ~300 m) 11.44 m ve çok engebeli bölgelerde (yükseklik değişimi ~4000 m) 19.64 m olarak rapor edilmiştir. Buradan ulaşılan sonuç SRTM SYM'nin öngörülen doğruluğunun yalnızca düz arazilerde sağlanabildiği şeklindedir. Ancak atıf edilen çalışmanın ortaya koyduğu sonuç değerlendirilirken modelin engebeli arazi testlerinin gerçekleştirildiği Himalaya dağlık bölgesinin başlangıç veri boşluklarının en yoğun

olduğu bölgelerden biri olduğu, ve test edilen dördüncü sürüm C-bant modelde söz konusu boşlukların interpolasyon yaklaşımı ile doldurulmuş olduğu da göz önünde tutulması gereken bir husus olduğu belirtilmiştir.

2.3 HGM DTED2

Harita Genel Müdürlüğü tarafından 1:25K ölçekli ülke topografik haritalarının otomatik vektörizasyonu ile pafta bazında sayısal ortama aktarılan verilerden DTED2 formatında 1" çözünürlüklü SYM'li üretilmiştir (Yılmaz vd. 2015, Int Kyn. 5). Yükseklik verileri ülke düşey datumundadır (TUDKA99) (bkz. Çizelge.1) (Int Kayn. 5). Veriler hizmete özeldir, Harita Genel Müdürlüğü tarafından kamu kurum ve kuruluşlarına bedeli karşılığı sağlanmaktadır.

Çizelge 1. Sayısal Yükseklik Modellerinin özellikleri.

SYM Verisi	ASTER	SRTM	DTED2
Kapsamı	Global	Global	Türkiye
Çözünürlük	1" ve 3"	1", 3", 30"	1"
Veri Türü	Stereo-(çift) görüntü	RADAR	Sayısallaştırma
2B Datum	WGS84	WGS84	WGS84
Düşey Datum	EGM96	EGM96	TUDKA99
Kaynak	Int Kyn. 3	Int Kyn. 4	Int Kyn. 5

2.4 GNSS/Nivelman Verileri

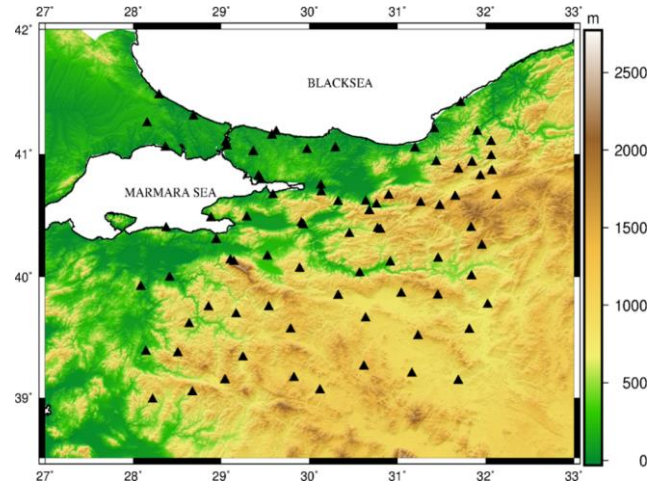
Sayısal Yükseklik Modellerinin doğruluklarının test edilmesinde aynı çalışma alanında ölçülmüş üç farklı jeodezik veri seti ile çalışılmıştır (bkz. Çizelge.2). Modellerin test edildiği çalışma alanı Türkiye'nin kuzey batısında 39°N-42°N enlemleri ile 28°E-32°E boylamları arasında kalan bölgeyi kapsar (Şekil.1). Çalışma alanı topografyası heterojen özellikte ve deniz seviyesinden itibaren 2500 metreye yükselmektedir. Bu yapıyı itibariyle SYM verilerinin doğruluğunun objektif olarak test edilmesi için laboratuvar koşullarına sahiptir.

Testlerde kullanılan ilk veri seti çalışma alanının tamamını kapsayan ve ortometrik yükseklikleri nivelman ölçmeleri ile belirlenmiş Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) noktalarıdır (Ayhan vd. 2002). 75 adet noktanın topografya üzerinde dağılımı Şekil.1'de görülmektedir. Nokta

koordinatları ITRF96 datumunda, ortometrik yükseklikleri ülke düşey datumundadır (TUDKA99).

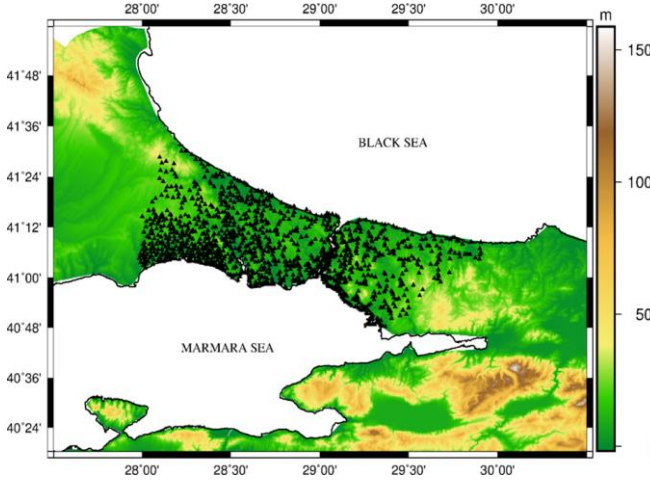
Çizelge 2. GNSS/nivelman verilerinin özellikleri.

Veri Seti	TUTGA	IGNA	Sakarya
Kapsamı	3°x4°	1°x2°	1°x1.5°
Nokta sayısı	75	1204	109
Nokta yoğunluğu	1nokta/45km	1 nokta/5km	1 nokta/13km
Nokta dağılımı	homojen ve seyrek	homojen ve sık	homojen ve karma
3B Datum	ITRF96	ITRF96	ITRF96
Düşey Datum	TUDKA99	TUDKA99	TUDKA99
Topografya	0-2500 m	0-500 m	0-1800 m
Kaynak	Ayhan vd. (2002)	Ayan vd. (2006)	Çelik vd. (2002)



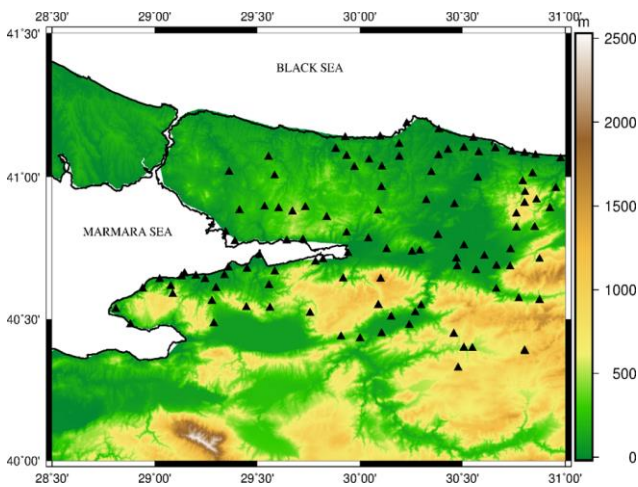
Şekil 1. TUTGA GNSS/nivelman noktalarının topografya üzerindeki dağılımı.

ikinci veri seti, 2006 yılında tesis edilen İstanbul GPS Nirengi Ağı noktalarından teşkil etmektedir. Noktaların üç boyutlu koordinatları ITRF96 datumunda, GNSS ölçmeleri ile belirlenmiştir. Ortometrik yükseklikleri nivelman ölçmelerinin dengelenmesi ile ülke yükseklik datumunda hesaplanmıştır (Ayan vd. 2006). Noktaların elipsoidal koordinatlarının doğruluğu ($\sigma_{\phi, \lambda}$, σ_h) sırasıyla ± 1.5 cm, ± 2.5 cm, ve ortometrik yükseklik doğruluğu (σ_H) ± 1.0 cm olarak verilmektedir (Ayan vd. 2006). 1204 adet IGNA noktasının çalışma alanında sıklığı 5 km de 1 noktadır.



Şekil 2. IGNA GPS/nivelman noktalarının topografya üzerindeki dağılımı.

Sayısal yükseklik modellerinin doğruluk analizinde kullanılan üçüncü veri seti ikinci veri setine kıyasla çalışma alanının daha engebeli topografik özelliklere sahip olan doğu kesiminde tesis edilmiş Sakarya GNSS/nivelman ağı noktalarından oluşmaktadır. Noktaların topografya üzerindeki dağılımı Şekil.3 de gösterilmektedir. C2 ve C3 derece ağ hiyerarşisinde tanımlı 109 adet noktanın ITRF96 datumunda elipsoidal koordinatları GNSS ölçmeleri ile ülke yükseklik datumunda ortometrik yükseklikleri presizyonlu nivelman ölçmeleri ile belirlenmiştir. Elipsoidal koordinatların doğruluğu ($\sigma_{\phi, \lambda}$, σ_h) sırasıyla ± 1.5 cm, ± 2.5 cm ve ortometrik yüksekliklerin rölatif doğruluğu ± 0.2 ppm dir (Çelik vd. 2002). Noktaların dağılım sıklığı 13 km'de 1 noktadır.



Şekil 3. Sakarya GPS/nivelman noktalarının topografya üzerindeki dağılımı.

2.5 SYM Verilerinin Doğruluk Analizi

Verilen üç jeodezik ağı ilişkin GNSS/nivelman verileri kullanılarak çalışmada değerlendirilen global ve bölgesel SYM'lerinin doğrulukları analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde ASTER ve SRTM global SYM'lerinin iki farklı çözünürlükte (1"ve 3") kullanıcılara sunulan güncel ürünlerinin her ikisi de değerlendirilmiştir. Böylesi bir değerlendirmede amaç aynı modele ilişkin farklı çözünürlükte servis edilen iki ürün arasında da olası kalite ve performans farklarının araştırılması ve netleştirilmesidir. Yüksek çözünürlüklü SYM verileri ile çalışmak, hesaplama, modelleme ve analizler gerçekleştirmek, özellikle geniş alanları kapsayan çalışmalarda yüksek işlemcili güçlü donanımlar ile çalışmayı gerektirir. Böylesi uygulamalarda çalışmanın ekonomisini optimize etmek amacıyla seçilen modelin düşük çözünürlüklü sürümü ile çalışılması veya yüksek çözünürlüklü modelin mekânsal çözünürlüğünün seyrelterek kullanılması yoluna gidilebilir.

Çalışmada değerlendirilen SYM'lerinin yersel veri setleri ile bağımsız olarak test edilmesinde iki farklı strateji takip edilmiştir. Birinci değerlendirme (I. test) stratejisinde SYM verilerine ait grid noktalarından bilineer interpolasyon yöntemi yardımıyla GNSS/nivelman kontrol noktalarında türetilen yükseklik değerleri (H_{SYM}) ile bu noktaların TUDKA99 datumundaki ortometrik yükseklikleri (H_{TUDKA}) ile olan farkları ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$) değerlendirilmiştir. İkinci değerlendirme (II. test) stratejisinde ise GNSS/nivelman noktalarında interpolasyon ile SYM'inden türetilmiş olan H_{SYM} yükseklik değerleri bu kez de noktaların GNSS elipsoidal yükseklikleri (h_{GNSS}) ile karşılaştırılmıştır. Ancak bu karşılaştırma h_{GNSS} elipsoidal yüksekliklerin global geoid modelinden (EGM96) hesaplanan geoid yüksekliklerin (N_{EGM96}) kullanılması ile EGM96 datumuna dönüştürülmüş yükseklikleri ($H_{GNSS/EGM96} = h_{GNSS} - N_{EGM96}$) dikkate alınarak başarılmıştır. Dolayısıyla II. test stratejisi GNSS/nivelman noktalarında $\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$ yükseklik farklarının istatistiklerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

İkinci değerlendirme stratejisinde GNSS elipsoidal yüksekliklerinin SYM'lerin yükseklik datumunda fiziksel yüksekliklere dönüştürülmesinde açınım

derecesi $\ell_{maks.}=360$ olan Earth Gravitational Model 1996 (EGM96) kullanılmıştır, çünkü test edilen SYM'lerinin düşey datumu bu jeopotansiyel model ile tarif edilmiştir (bkz. Çizelge.1).

EGM96 Birleşik Devletlerin National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) kurumunun Geomatik Dairesi tarafından hesaplanarak yayınlanmıştır (Lemoine *et al.* 1998). Model kullanıcılara $\ell=360$ açınım derecesinde küresel harmonik katsayılar ile servis edilir. Modelin katsayılarına Int Kyn. 10' dan erişilmektedir. Çalışma bölgesine EGM96 modeli katsayıları ile geoit yüksekliği hesabı:

$$N_{EGM96} = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{\ell=2}^{\ell_{max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{\ell} \sum_{m=0}^{\ell} (\Delta\bar{C}_{\ell m} \cos m\lambda + \bar{S}_{\ell m} \sin m\lambda) \bar{P}_{\ell m}(\cos\theta) \quad (1)$$

eşitliğine göre hesaplanmıştır (Hofmann-Wellenhof and Moritz 2006). Denklemden (ℓ, m) modelin derece ve mertebesi, (θ, λ, r) sırasıyla tamamlanmış enlem, jeodezik boylam ve hesap noktasının merkezi yarıçapıdır. a referans elipsoidinin büyük eksen yarıçapı, GM m^3/s^2 biriminde Newton'un çekim sabiti ile yeryuvarı kütesinin çarpımı, γ m/s^2 biriminde referans elipsoidinin ortalama gravite değeri, $\Delta\bar{C}_{\ell m}$ ve $\bar{S}_{\ell m}$ birimsiz normalleştirilmiş küresel harmonik katsayıları göstermektedir (Hofmann-Wellenhof and Moritz 2006). Geoit yüksekliği N_{EGM96} metre biriminde, verilen eşitlikten hesaplanır. Eşitlikte verilen genel gösterimde açınım derecesinin $\ell=2$ 'den başladığı görülmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda sıfır-dereceden katsayı değeri hesaba dâhil edilerek hesaplanan geoit yükseklikleri GRS80 referans elipsoidine göre gerçekleştirilmiştir (Erol *et al.* 2020). Hesaplamalar gelgitten bağımsız (tide-free) sistemde gerçekleştirilmiştir. (Int Kyn. 10) EGM96 modelinin Avrupa'daki doğruluğunu, 1047 adet GNSS/nivelman noktasında hesaplanan geoit yükseklik farklarının istatistiklerine dayanarak 49.3 cm olarak bildirmiştir. Erol (2007) tarafından GNSS/nivelman verileri ile gerçekleştirilen testler neticesinde Türkiye'nin batısında ve çalışma alanında EGM96 modelinin doğruluğu ~ 27.0 cm dir. Hata yayılma teorisine göre ikinci değerlendirme stratejisinde GNSS elipsoidal yüksekliklerden ($\sigma_{h_{GNSS}} \approx 2.5$ cm) EGM96 geoit modelinden elde

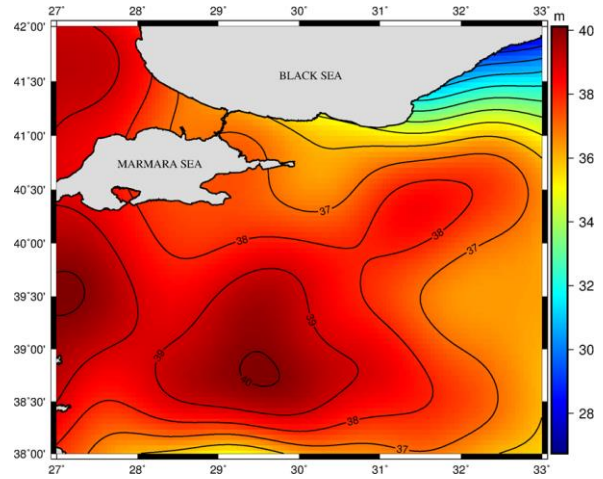
edilen geoit yüksekliklerinin ($\sigma_{N_{EGM96}} \approx 27.0$ cm) çıkartılması ile elde edilen fiziksel yüksekliklerin doğruluğu

$$\sigma_{H_{GNSS/EGM96}} = \sqrt{\sigma_{h_{GNSS}}^2 + \sigma_{N_{EGM96}}^2}$$

yaklaşık 27.11 cm dir. Elde edilen doğruluk SYM'lerinin test edilmesi ve doğruluklarının analizi için yeterlidir.

Çizelge.1 de görüldüğü üzere test edilen SYM'lerinin grid noktalarının elipsoidal enlem ve boylamları WGS84 datumunda verilmektedir. WGS84 ve ITRF datumu çakışık kabul edilebilir olması dolayısıyla (Int Kyn. 11), SYM'ler ve test edilecek üç jeodezik ağı kontrol noktaları aynı koordinat datumunda kabul edilmiştir.

Çalışma bölgesinde EGM96 global geoit modeli Şekil.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Çalışma bölgesinde EGM96 geoit modeli yüzeyi.

3. Sayısal Test Sonuçları

Çalışmada test edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin değerlendirilmesinde takip edilen birinci stratejiden elde edilen istatistiksel sonuçlar Çizelge.3, 4 ve 5 de verilmektedir. Modellerin doğruluk analizine ilişkin istatistikler, jeodezik ağların farklı zamanlarda ölçülerek ayrı ayrı dengelenmiş olmaları ve ağ hiyerarşik seviyelerinin farklı olması dolayısıyla; üç veri seti için (TUTGA, IGNA ve Sakarya GNSS/nivelman ağları noktalarında) bağımsız olarak hesaplanmış ve tablolarda ayrı ayrı sunulmuştur.

Çizelgelerde verilen istatistikler karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tüm modeller ile hesaplanan yükseklik farklarının ortalama değerleri IGNA verilerinde ~ 2 m ila 4 m, Sakarya verilerinde ~ 4 m ila 9 m ve

TUTGA verilerinde ~5 m ila 10 m aralığında değişim göstermektedir.

- TUDKA99 datumunda ortometrik yükseklikler ile SYM verileri arasındaki farkların standart sapmaları ve ortalama değerleri birlikte dikkate alındığında her üç veri seti için hesaplanan istatistiklerde en yüksek doğruluğu (farkların k.o.h. ile) HGM DTED2 (1") modelinin sağladığı gözlenmiştir.
- Birinci test yaklaşımında HGM DTED2 modelinin sağladığı doğruluk, yükseklik farklarının karesel ortalama hataları (k.o.h.) cinsinden: ($k.o.h. = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$; μ : ortalama, σ : standart sapma (std. sapma)), her üç veri setinde ağırlık kapsama alanından ve alanın topografik özelliklerinden bağımsız olarak tutarlılık göstermektedir. Modelin doğruluğu (hesaplanan k.o.h. değerleri cinsinden): TUTGA veri seti için 6.831 m, IGNA veri seti için 5.267 m, Sakarya veri seti için 6.397 m olarak hesaplanmıştır.
- HGM DTED2 modelinin homojen doğruluğuna karşın ASTER GDEM ve SRTM (3" ve 1") SYM'lerin doğrulukları çalışma alanının topografik yüksekliklerinin değişimine bağlı olarak: düz topografyada IGNA veri seti için (yükseklik değişimi 0 ile 500 m) ortalama 5.5 m (DTED2 ~5.2 m), engebeli topografyada Sakarya veri seti için (yükseklik değişimi 0 ile 1800 m) ortalama 8.5 m (DTED2 ~6.3 m), heterojen özellikteki topografyada TUTGA veri seti için (yükseklik değişimi 0 ile 2500 m) ortalama 11.0 m (DTED2 ~6.8 m) olarak hesaplanmıştır.
- Bir önceki sonuç maddesinde verilen, yükseklik farklarına ilişkin ortalama k.o.h. değerlerinde 3" çözünürlüklü SRTM C-bant modelinin istatistikleri karşılaştırmaya dâhil edilmemiştir. SRTM C-bant modelinin doğruluğu test bölgesinin topografik özelliklerine bağlı olarak anlamlı değişim göstermektedir. Engebeli topografyayı temsil eden Sakarya ve TUTGA veri setlerinde oldukça büyük k.o.h. değerleri ortaya koymuştur. Modelin IGNA veri setinde sahip olduğu doğruluk ~6.9 cm dir. Bu değer diğer modellerden desimetre seviyesinde farklıdır. Ancak Sakarya veri seti için doğruluğu ~11.9 m

dir ve bu doğruluk diğer modellerin ortaya koyduğu doğruluktan ~3.5 m daha kabadır. Modelin heterojen özellikte topografya yapısını temsil eden TUTGA veri seti ile sağladığı doğruluk ~14.1 m dir. Söz konusu k.o.h. değeri diğer global modeller için hesaplanan ortalama k.o.h. büyüklüğünden (~10.9 cm) yaklaşık 3.2 m daha kabadır.

Çizelge 3. 75 adet TUTGA GNSS/nivelman noktalarında ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std.sapma (m)
ASTER 3"	-4.413	36.328	9.758	7.494
ASTER 1"	-8.225	37.255	7.794	7.830
SRTM 3"	-19.602	37.140	10.145	9.752
SRTM 1"	-8.355	23.634	6.711	6.555
DTED2 1"	-5.446	22.462	5.162	4.475

Çizelge 4. 1204 adet IGNA GNSS/nivelman noktalarında ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-19.158	26.189	2.632	5.404
ASTER 1"	-24.021	24.633	1.826	5.215
SRTM 3"	-26.619	32.230	4.101	5.617
SRTM 1"	-14.923	30.948	2.891	3.934
DTED2 1"	-58.077	33.058	3.491	3.944

Çizelge 5. 109 adet Sakarya GNSS/nivelman noktalarında ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. Sapma (m)
ASTER 3"	-6.731	25.194	5.853	6.807
ASTER 1"	-11.808	34.199	4.415	6.658
SRTM 3"	-15.011	35.503	8.628	8.166
SRTM 1"	-8.974	32.840	5.583	6.106
DTED2 1"	-10.118	21.138	4.737	4.299

- SRTM C-bant (3" çözünürlüklü) SYM verilerinin her üç test ağındaki doğruluk analizlerine bakılarak modelin düz topografyada (IGNA veri seti 6.9 m k.o.h.) SRTM'in öngörülen global doğruluk değerinden (~9.7 m k.o.h.) daha yüksek doğruluk sağladığı ancak engebeli topografyada (Sakarya veri seti 11.9 m k.o.h.) öngörülenden daha kaba doğruluğa sahip olduğu değerlendirilmiştir.
- SRTM X-bant (1") SYM'nin C-bant (3") modelinden tüm veri setlerinde daha yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Sırasıyla X-bant

ve C-bant modellerinin k.o.h. değerleri: IGNA veri setinde 4.9 m ve 7.0 m (fark 2.1 m), Sakarya veri setinde 8.3 m ve 11.9 m (fark 3.6 m), TUTGA veri setinde 9.4 m ve 14.1 m (fark 4.7 m). Bu sonuçlar değerlendirildiğinde SRTM X-bant modelinin topografyanın engebeli olduğu bölgelerde sağladığı avantajın düzlüklerdeki üstünlüğünün iki katından fazla olduğu görülmektedir.

- SRTM C- ve X-bant modelleri arasında gözlenen anlamlı performans farkı ASTER GDEM modellerinin 1"ve 3" çözünürlüklü sürümleri arasında gözlenmez. Bunun nedeni 3" çözünürlüklü ASTER GDEM modelinin orijinal 1"çözünürlüklü modelin seyrekleştirilmesi ile elde edilmiş olmasından dolayıdır. Test edilen iki farklı mekânsal çözünürlükteki ASTER GDEM modeli SRTM C- ve X- bant modeller gibi farklı frekanslı ölçü büyüklüklerine dayanmamaktadır. Ancak iki farklı çözünürlükteki modelin (sırasıyla 1" ve 3") k.o.h. değerleri arasındaki farklar: IGNA veri seti için: 5.5 m ve 6.0 m (fark 0.5 m), Sakarya veri seti için: 8.0 m ve 9.0 m (fark 1 m), TUTGA veri seti için: 11.0 m ve 12.3 m (fark 1.3 m) olarak hesaplanmıştır. İki modelin k.o.h. değerlerindeki farklılık SYM grid noktalarındaki yükseklik değerlerinin GNSS/nivelman noktalarına türetilmesinde uygulanan interpolasyon hatasından kaynaklanmaktadır. Mekânsal çözünürlüğü yüksek grid veriden kontrol noktaları için değer türetilmesinde interpolasyon hatası daha küçüktür. İnterpolasyon işleminden kaynaklanan hata miktarı topografya yükseklik değişimi arttıkça büyümektedir. Söz konusu interpolasyon hatası engebeli alanlarda interpolasyona katkı verecek yakın komşuluktaki noktasal değerlerin ağırlığının artırılması ile azaltılabilir.
- 1"mekânsal çözünürlüğe sahip ASTER GDEM ve SRTM X-bant modelleri karşılaştırıldığında genel olarak SRTM X-bant SYM'nin test bölgelerinde ASTER GDEM den daha yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir. GNSS/nivelman noktalarında yükseklik farklarının k.o.h. ile değerlendirildiğinde, sırasıyla SRTM X-bant ve ASTER GDEM (1") doğrulukları, IGNA veri seti için: 4.9 m ve 5.5 m (fark 0.6 m), Sakarya veri seti

inçin: 8.3 m ve 8.0 m (fark -0.3 m), TUTGA veri seti için: 9.4 m ve 11.0 m (fark 1.7 m).

- Global ve bölgesel SYM'leri karşılaştırması için; sırasıyla SRTM X-bant ve HGM DTED2 modelleri için k.o.h. değerleri, IGNA veri seti için: 4.9 m ve 5.3 m (fark -0.4 m), Sakarya veri seti için: 8.3 m ve 6.4 m (fark 1.9 m), TUTGA veri seti için: 9.4 m ve 6.8 m (fark 2.5 m) dir.
- Birinci değerlendirme yaklaşımında her bir veri setinde kullanılan ortometrik yüksekliklerin doğruluğunun SYM doğruluk analizlerini gerçekleştirmek için yeterli olduğu görülmüştür. SYM'lerinin doğruluk analizlerinde elde edilen sonuçların testlerde kullanılan GNSS/nivelman verilerinin topografya üzerinde dağılımı (topografik yükseklik değişimini temsil edecek şekilde homojen) ile ilişkili ancak nokta sıklığından bağımsız olduğu görülmüştür. İkinci değerlendirme yaklaşımından elde edilen istatistiksel sonuçlar Çizelge.6, 7 ve 8 de verilmektedir.

Çizelge 6. 75 adet TUTGA GNSS/nivelman noktalarında ($\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-3.911	36.583	9.974	7.504
ASTER 1"	-7.724	37.510	8.002	7.806
SRTM 3"	-18.532	38.361	10.364	9.847
SRTM 1"	-7.286	24.194	6.919	6.609
DTED2 1"	-6.438	23.638	5.340	4.769

Çizelge 7. 1204 adet IGNA GNSS/nivelman noktalarında ($\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$) yükseklik farklarının istatistikleri (m).

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-19.378	25.900	2.660	5.409
ASTER 1"	-24.240	24.344	1.816	5.239
SRTM 3"	-26.570	32.016	4.119	5.642
SRTM 1"	-14.874	30.658	2.881	3.962
DTED2 1"	-57.970	33.376	3.482	3.945

Çizelge 8. 109 adet Sakarya GNSS/nivelman noktalarında ($\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-7.124	25.328	5.914	6.863
ASTER 1"	-11.370	34.333	4.461	6.696
SRTM 3"	-14.900	35.724	8.707	8.193
SRTM 1"	-8.161	33.061	5.629	6.099
DTED2 1"	-9.305	21.331	4.783	4.336

SYM'lerinin doğruluklarının analiz edilmesinde takip edilen ikinci yaklaşımda her bir model için jeodezik ağ noktalarında hesaplanan yükseklik farklarının k.o.h. değerlerinin birinci yaklaşımda (ortometrik yükseklikler kullanılarak) gerçekleştirilen testlerde elde edilen k.o.h. değerlerine oldukça yakın değerler oldukları görülmüştür. Birinci ve ikinci test yaklaşımında elde edilen yükseklik farklarının k.o.h. değerleri ve k.o.h. değerleri arasındaki farklar Çizelge.9 da verilmektedir. K.o.h. büyüklükleri arasındaki ($\Delta = m_{\Delta H_{II}} - m_{\Delta H_I}$) farkların yalnızca en geniş alanı kapsayan ve heterojen karakterde bir topografya yapısını temsil eden TUTGA ağında gerçekleştirilen testlerde desimetre mertebesine ulaştığı (HGM DTED2 modelinin TUTGA veri setinde gerçekleştirilen testlerinde en fazla $\Delta \approx 33$ cm) görülmektedir. IGNA ve Sakarya veri setlerinde elde edilen Δ farkları ise en fazla (ASTER 3" modelinin Sakarya veri seti ile testinde) 8 cm olarak bulunmuştur.

Çizelge 9. SYM'nin iki farklı yaklaşım ile gerçekleştirilen doğruluk analiz sonuçlarının karşılaştırması: k.o.h. değerleri sırasıyla $m_{\Delta H_I}$ ve $m_{\Delta H_{II}}$.

SYM	Veri Seti	* $m_{\Delta H_I}$ (m)	* $m_{\Delta H_{II}}$ (m)	*fark (m)
ASTER 3"	TUTGA	12.3036	12.4816	0.178
	IGNA	6.0109	6.0277	0.017
	Sakarya	8.9774	9.0596	0.082
ASTER 1"	TUTGA	11.0479	11.1788	0.131
	IGNA	5.5254	5.5448	0.019
	Sakarya	7.9888	8.0459	0.057
SRTM 3"	TUTGA	14.0720	14.2960	0.224
	IGNA	6.9548	6.9856	0.031
	Sakarya	11.8796	11.9556	0.076
SRTM 1"	TUTGA	9.3811	9.5683	0.187
	IGNA	4.8820	4.8987	0.017
	Sakarya	8.2736	8.2996	0.026
DTED2 1"	TUTGA	6.8317	7.1595	0.328
	IGNA	5.2671	5.2619	-0.005
	Sakarya	6.3969	6.4558	0.059

$$* \Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}, \Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$$

$$H_{GNSS/EGM96} = h_{GNSS} - N_{EGM96}$$

$$m_{\Delta H_I} = \sqrt{\mu_{\Delta H_I}^2 + \sigma_{\Delta H_I}^2}, m_{\Delta H_{II}} = \sqrt{\mu_{\Delta H_{II}}^2 + \sigma_{\Delta H_{II}}^2}$$

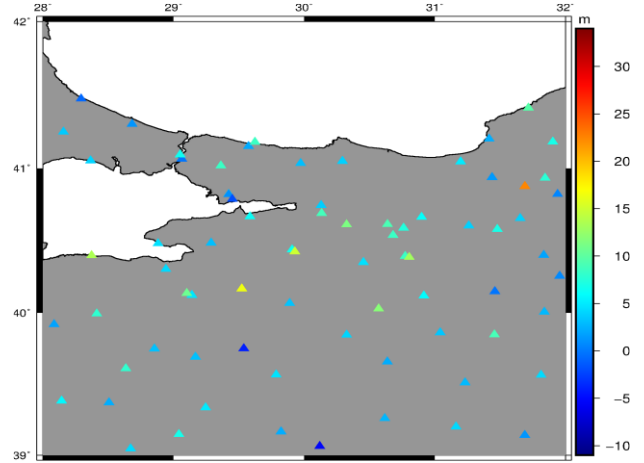
$$\mu : \text{ortalama değer}, \sigma : \text{standart sapma}, \Delta : \text{fark}$$

$$\Delta = m_{\Delta H_{II}} - m_{\Delta H_I}$$

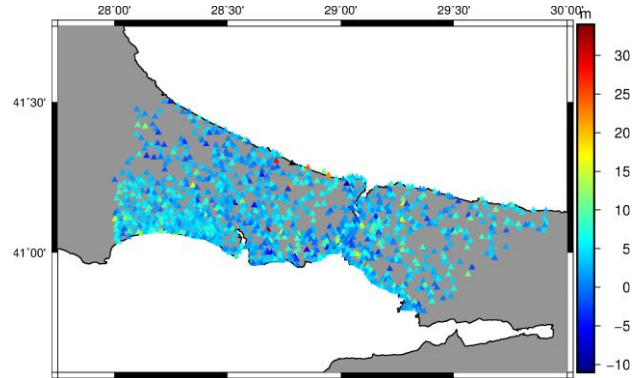
HGM DTED2 modelinin IGNA veri seti ile gerçekleştirilen doğruluk analizinde ortometrik ve elipsoidal yüksekliklerin kullanıldığı her iki test yaklaşımında da model için özdeş doğruluk verdiği

görülmüştür (Çizelge.9, $\Delta \approx 0.5$ cm). Bu durum test alanının görece küçük, topografyanın alçak ve düz, bölgede geoit değişiminin diğer iki test alanına kıyasla az olması ile açıklanabilir.

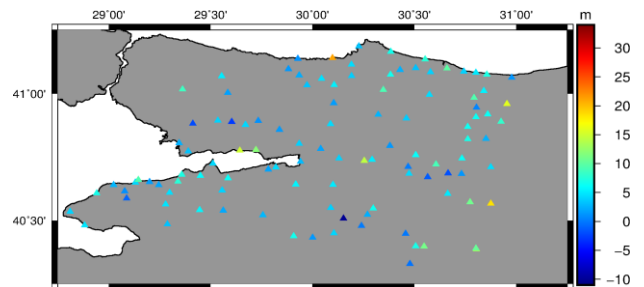
HGM DTED2 (1") modeli ile TUDKA99 ortometrik yükseklik farklarının TUTGA, IGNA ve Sakarya GNSS/nivelman noktalarındaki dağılımı sırasıyla Şekil.5, Şekil.6 ve Şekil.7'de görülmektedir.



Şekil 5. DTED2 SYM'linden elde edilen yüksekliklerin TUTGA GNSS/nivelman noktalarındaki yükseklikler ile farkları ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{DTED2}$).



Şekil 6. DTED2 SYM'linden elde edilen yüksekliklerin IGNA GNSS/nivelman noktalarındaki yükseklikler ile farkları ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{DTED2}$).



Şekil 7. DTED2 SYM'linden elde edilen yüksekliklerin Sakarya GNSS/nivelman noktalarındaki yükseklikler ile farkları ($\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{DTED2}$).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada global ASTER (1"ve 3"), SRTM X- ve C-bant (1"ve 3") ve bölgesel HGM DTED2 (1") SYM'leri Türkiye'nin kuzey batısında üç farklı GNSS/nivelman veri seti kullanılarak test edilmiştir. Değerlendirilen SYM'lerinin çalışma alanındaki doğruluklarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen testler bölgesel düşey datumda (TUDKA99) nivelman ölçmelerinden elde edilen ortometrik yükseklikler ile GNSS ölçmelerinden elde edilen elipsoidal yüksekliklerin kullanıldığı iki farklı değerlendirme yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Çalışma bölgesinde ASTER GDEM SYM'nin doğruluğu düz (IGNA veri seti ile elde edilen sonuçlar) ve engebeli (Sakarya veri seti ile elde edilen sonuçlar) özellikteki topografik bölgelerde modelin yayınlanmış global doğruluğundan daha yüksektir. ASTER modeline ilişkin öngörülen doğruluk 8.67 m olarak yayınlanmıştır, ancak çalışma bölgesinde modelin doğruluğu düzlüklerde ~5.52 m, engebeli topografyada ~7.98 m olarak hesaplanmıştır.
- SRTM X-bant modelinin doğruluğu düz ve engebeli topografyada C-bant modelin doğruluğundan daha iyidir. Topografyanın engebeli olduğu bölgede X-bant modelin üstünlüğü daha dikkate değer büyüklüktedir.
- SRTM X-bant (1") SYM'nin düz topografik bölgeyi temsil eden IGNA veri seti ile sağladığı doğruluk 4.88 m, engebeli topografyayı temsil eden Sakarya veri seti ile sağladığı doğruluk ise 8.27 m dir. SRTM SYM için rapor edilen global doğruluk değerinin ~9.72 m olduğu göz önüne alınırsa, SRTM X-bant SYM'nin çalışma bölgesinde engebeli alanda dahi öngörülenden daha üstün performans sağladığı görülmektedir.
- 1" çözünürlüklü iki global SYM arasındaki karşılaştırmada: SRTM X-bant modeli tüm karşılaştırmalarda ASTER GDEM'den daha yüksek doğruluk sağlarken, iki model arasındaki en büyük doğruluk farkı heterojen topografya yapısını temsil eden TUTGA veri seti ile gerçekleştirilen test sonuçlarında bulunmuştur. Elde edilen test sonuçlarında SRTM X-bant

modeli için 9.38 m k.o.h. değeri yanı sıra ASTER GDEM için 11.05 m k.o.h. değeri hesaplanmıştır. Çalışma bölgesinde gerçekleştirilecek çalışmalarda SRTM X-bant SYM kullanılması doğruluk açısından avantaj sağlayacaktır.

- Test edilen global SYM'nin doğruluğunun topografya ile ilişkili olduğu ve yükseklik arttıkça model doğruluğunun düştüğü tüm test sonuçlarında görülmektedir. Buna karşın 1:25K ölçekli topografik haritaların sayısallaştırılması ile elde edilen DTED2 SYM'nin doğruluğunun homojen olduğu ve global SYM'lerinden daha yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Engebeli topografik yapıyı temsil eden Sakarya verileri ile gerçekleştirilen testlerde SRTM X-bant modelinin doğruluğu 8.27 m iken HGM DTED2 modeli 6.40 m doğruluk sağlamıştır. Bölgesel DTED2 modelinin bedeli karşılığında ilgili kurumdan temin edilebiliyor olması yanı sıra global SYM'lerinin bedelsiz olarak kullanıcılara sunulması kullanıcıların tercihinde rol oynayacaktır.
- SYM'lerinin doğruluk analizinde GNSS/nivelman noktalarında nivelman ölçmelerinden elde edilen ortometrik yükseklikler ile geoit modeli ile dönüştürülmüş elipsoidal yükseklikler ayrı ayrı kullanılmış, her iki yaklaşımdan da elde edilen test sonuçları yakın istatistikler değerler ile SYM'lerinin doğruluklarına ilişkin aynı sonuçları ortaya koymuştur. Dolayısıyla her iki yersel veri seti de yeterli doğrulukta olmak koşulu ile SYM doğruluk analizinde kullanılabilir. Ancak elipsoidal yükseklikler ile gerçekleştirilen testlerde, kullanılacak geoit modelinin test edilen SYM'nin düşey datumu göz önünde bulundurularak seçilmesi, test sonuçlarında olası datum farklılıklarının etkisini azaltmak bakımından tavsiye edilmektedir.
- SYM'lerinin test edilmesinde kullanılan kontrol noktalarının çalışma bölgesindeki dağılımı ve topografyanın değişimlerini gerçekçi biçimde temsil etmesi önem arz etmektedir. Ancak testlerde kullanılan kontrol noktalarının sıklığının test sonuçlarına bir etkisi görülmemiştir.

Bu çalışmada test edilen global ve bölgesel SYM'lerinin doğruluklarına ilişkin bulgular

Türkiye'nin bütünü için kısmen genelleştirilebilecek niteliktedir. Çünkü global modellere ilişkin doğruluklar test bölgesinde topografik yüksekliklerin değişimi ve karakterinden büyük oranda etkilenmektedir. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan üç farklı veri seti farklı karakterdeki topografya yapısını temsil eder niteliktedir. Ancak özellikle global modeller için gerçekleştirilen testlerin, bu modellerin öncül sürümlerinin boşluklu yapı gösterdiği ve sonradan farklı teknikler ile onarıldığı bilinen bölgelerde (bu bölgeler Türkiye'nin kuzey doğusunda ve ülke topografyasının en fazla yükseldiği doğu bölgelerinde yer alır) yersel ve GNSS kontrol verileri ile tekrarlanması önerilir. Üç farklı topografik karakterdeki bölge için yinelenen testlerde bölgesel HGM DTED2 modelinin görece topografyanın özelliklerinden bağımsız olarak homojen doğruluk ortaya koyduğu gözlenmiştir. Bu gözleme dayanılarak HGM DTED2 verilerinin doğruluğunun ülke genelinde geçerli olabileceği değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından (Proje No.114Y581) ve İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) programı kapsamında (Proje No. MGA-2018-41585) desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan bölgesel SYM DTED2 ve TUTGA verileri Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan GNSS/nivelman verileri için İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi Anabilim Dalına teşekkür ederiz. Çalışmanın öncül sonuçları ISGGG2017 uluslararası sempozyumunda bildiri olarak sunulmuştur.

5. Kaynaklar

Agrawal, R., Mahtab, A., Jayaprasad, P., Pathan, S. and Ajai, K., 2006. Validating SRTM DEM with Differential GPS Measurements - A Case Study With Different Terrains. *Proceedings of the ISPRS Symposium*, Goa, India, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Çelik, R. N., Denli, H.H., Akyılmaz, O., Özşamlı, C., Özlüdemir, M.T., Erol, S., Erol, B., Acar, M., Mercan, H. ve Tekdal, E., 2006. İstanbul GPS nirengi ağı (İGNA) 2005-2006 Yenileme

Ölçü ve Değerlendirmesi. Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ayhan, M.E., Demir, C., Lenk, O., Kılıçoğlu, A., Aktug, B., Açıkgöz, M., Fırat, O., Şengün, Y.S., Cingöz, A., Gürdal, M.A., Kurt, A.İ., Ocak, M., Türkez, A., Yıldız, H., Bayazit, N., At M., Çağlar, Y. ve Özerkan, A., 2002. Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999 (TUTGA-99A). *Harita Dergisi*, **16**, 1–80.

Bildirici, İ. Ö. and Abbak, R. A., 2017. Comparison of ASTER and SRTM Digital Elevation Models At One-Arc-Second Resolution Over Turkey. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **5(1)**, 16-25.

Bildirici, İ.Ö. ve Abbak, R. A., 2020. Türkiye ve Çevresinde SRTM Sayısal Yükseklik Modelinin Doğruluğu. *Geomatik*, **5(1)**, 1-11.

Bildirici, İ. Ö., Üstün, A., Selvi, Z.H., Abbak, R.A. and Bugdayci, İ., 2009. Assessment of Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data Based On Topographic Maps in Turkey. *Cartography and Geographic Information Science*, **36(1)**, 95-104.

Çelik, R. N., Ayan, T. and Erol, B., 2002. Geodetic Infrastructure Project of Marmara Earthquake Region Land Information System (MERLIS). Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, ITU 2002/06/20. **1**.

Erol, B., 2007. Investigations on Local Geoids for Geodetic Applications. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 234.

Erol, B., Işık, M.S. and Erol, S., 2020. An Assessment of the GOCE High-Level Processing Facility (HPF) Released Global Geopotential Models with Regional Test Results in Turkey. *Remote Sensing* **12(3)**, 586.

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of geophysics*, **45(2)**.

Gesch, D., Oimoen, M.J., Danielson, J.J. and Meyer, D., 2016. Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model Version 3 Over the Conterminous United States. *The International Archives of*

- Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **41**, 143.
- Hirt, C., 2016. Digital Terrain Models. Encyclopedia of Geodesy. Springer.
- Hirt, C., Filmer, M.S. and Featherstone, W.E., 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 Digital Elevation Models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, **57**(3), 337-347.
- Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H., 2006. Physical Geodesy, Springer Verlag.
- Işık, M.S., Erol, B. and Erol, S., 2017. Analysis on the Quality of High-Resolution Global Digital Terrain Models (DTM) using GPS/leveling Data in Turkey. *Proceedings of the International Symposium on GIS Applications in Geography and Geosciences (ISGGG)*, 18-21 Ekim, Çanakkale, Türkiye. 192-201.
- Kolecka, N. and Kozak, J., 2014. Assessment of the accuracy of SRTM C-and X-Band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*, **171**(6), 897-912.
- Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B. and Torrence, M. H., 1998. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. Teknik Rapor, NASA/TP-1998-206861, Earth Resources And Remote Sensing, NASA Goddard Space Flight Center, 584.
- Luedeling, E., Siebert, S. and Buerkert, A., 2007. Filling the voids in the SRTM elevation model—A TIN-based delta surface approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**(4), 283-294.
- Maune, D. F. and Nayegandhi, A., 2019. Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual 3rd Edition, ASPRS Publications.
- Mouratidis, A., Briole, P. and Katsambalos, K., 2010. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, **31**(23), 6205-6222.
- Mouratidis, A., Karadimou, G. and Dimitrios, A., 2017. Extraction and Validation of Geomorphological Features from EU-DEM in the Vicinity of the Mygdonia Basin, Northern Greece. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **95**, 032009, 2-9. doi :10.1088/1755-1315/95/3/032009
- Mukherjee, S., Joshi, P.K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Grag, R.D. and Mukhopadhyay, A., 2013. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **21**, 205-217.
- Mukul, M., Srivastava, V. and Mukul, M., 2015. Analysis of the accuracy of shuttle radar topography mission (SRTM) height models using international global navigation satellite system service (IGS) network. *Journal of Earth System Science*, **124**(6), 1343-1357.
- Mukul, M. S., Srivastava, V., Jade, S. and Mukul, M., 2017. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, **7**, 41672.
- Sümer, E. Ö., Gürçay, B., Pekesin, B. F., Avcı, K., Koruyucu, M., Dağlıyar, A., Teoman, A., Topçu, T. and Özgüner, C., 2006. ASTER Uydu Verisi Uygulamaları: Türkiye'den Örnekler. Özel Yayın Serisi-5, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 70, Ankara. ISBN: 975-8964-41-0.
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M., Crippen, R. and Carabajal, C., 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. U.S., NASA Land Processes Distributed Active Archive Center 25.
- Varga, M. and Bašić, T., 2013. Quality Assessment And Comparison Of Global Digital Elevation Models on the Territory of Republic of Croatia. *Kartografija i geoinformacije (Cartography and Geoinformation)*, **12**(20), 4-17.
- Varga, M. and Bašić, T., 2015. Accuracy Validation And Comparison of Global Digital Elevation Models over Croatia. *International Journal of Remote Sensing*, **36**(1), 170-189.

Wechsler, S. P., 2003. Perceptions of digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users. *Urisa-Washington DC*, **15**(2), 57-64.

Yap, L., Kandé, L.H., Nouayou, R., Kamguia, J., Ngouh, N.A. and Makuate M.B., 2019. Vertical Accuracy Evaluation Of Freely Available Latest High-Resolution (30 m) Global Digital Elevation Models over Cameroon (Central Africa) with GPS/leveling Ground Control Points. *International Journal of Digital Earth*, **12**(5), 500-524.

Yılmaz A., Alp O., Okul A., Eker O. ve Erdoğan M., 2015. Türkiye için Hassas Yükseklik Modeli Üretimi. *TUFUAB III. Teknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 21-25 Mayıs, Konya, 294-301.

Yue, L., Shen, H., Zhang, L., Zheng, X., Zhang, F. and Yuan, Q., 2017. High-quality Seamless DEM Generation Blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS Observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **123**, 20-34.

İnternet kaynakları

1- <https://earthexplorer.usgs.gov/>, (27.05.2020).

2- <https://idems.maps.arcgis.com/home/index.html>, (28.05.2020).

3- <https://asterweb.jpl.nasa.gov/>, (29.05.2020)

4- <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, (29.05.2020)

5- <https://www.harita.gov.tr/anasayfa>, (29.05.2020)

6- https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716/, (29.05.2020)

7- <https://www.nga.mil/About/History/NGAinHistory/Pages/SRTM.aspx>, (29.05.2020)

8- <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, (29.05.2020)

9- <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>, (29.05.2020)

10- <http://icgem.gfz-potsdam.de/>, (29.05.2020)

11- https://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/template/WGS_84.pdf, (29.05.2020)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045502 (613-622)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045502 (613-622)

DOI: 10.35414/ akufemubid.746249

Araştırma Makalesi / Research Article

GNSS Tabanlı Tektonik Uygulamalar için Çevirim İçi Bir Servis: Tektonik Araçlar

Halil İbrahim SOLAK^{1*}, İbrahim TIRYAKIOĞLU²¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Meslek Yüksekokulu, Afyonkarahisar.²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.Sorumlu yazar e-posta: hisolak@aku.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5286-0369>
e-posta: itiryakioglu@aku.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4954-7109>

Geliş Tarihi: 01.06.2020

Kabul Tarihi: 26.08.2020

Öz

GNSS (Global Navigation Satellite System) teknolojisinin gelişmesi ile birlikte haritacılık uygulamaları çeşitlenmiştir. Bunlardan biri GNSS tabanlı tektonik uygulamalardır. GNSS tabanlı bir tektonik uygulama süreci temel olarak ağ planlaması, GNSS gözlemleri, elde edilen verilerin kontrolü, değerlendirmeye hazır hale getirilmesi, değerlendirilmesi ve sonuçların yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamaların uygulanması sırasında el yordamıyla yapılması gereken dosya düzenleme, oluşturma, birleştirme, kalite kontrolü, çeşitli yazılımlar yardımıyla ara kontrol, ara çıktıların üretilmesi, çıktı dosyalarının başka bir yazılımın girdi dosyasına dönüştürülmesi, koordinat dönüşümü gibi uzun zaman alan, bazıları için Linux işletim sistemi gerektiren ve karmaşık olan ara işlemler bulunmaktadır. Bu durum işlem sürecini uzatmakta ve hata olasılığını arttırabilmektedir. Bahsedilen durumlar göz önünde bulundurulduğunda bu sürecin hem çalışma hem de araştırmacılar için bir dezavantaj oluşturduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında ilgili alanlarda çalışan tüm araştırmacıların ücretsiz olarak kullanabilmesi için yazarlar tarafından geliştirilen ve Tektonik Araçlar olarak adlandırılan, yukarıda bahsedilen işlemleri pratik olarak gerçekleştirmeye yarayan Python tabanlı çevirim içi bir servis örnek uygulama ile anlatılmıştır.

Anahtar kelimeler

GNSS; Tektonik;
Python; Flask; Tektonik
Araçlar

An Online Service for GNSS-Based Tectonic Applications: Tectonic Tools

Abstract

Geomatics applications have diversified with the development of GNSS technology and one of them is GNSS-based tectonic applications. A GNSS-based tectonic application process is consists of a network planning, static GNSS observations, control of the data obtained, preparation of data for evaluation, evaluation of data and interpretation of the results. During the application of these stages, there are preparation processes that require a long time, dependent on the operating system and complex like file editing, creating, merging, data quality control, producing intermediate outputs, manually converting output files into the input file of another software, coordinate conversion. This can prolong the process and increase the likelihood of errors. Considering these conditions, it is considered that this process creates a disadvantage for both the study and the researchers. Within the scope of this study, a Python-based online service, which is developed by the authors and called as Tectonic Tools for practicing all the researchers working in the related fields, is explained with a sample application.

Keywords

GNSS; Tectonic;
Python; Flask; Tectonic
Tools

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

GNSS teknolojisinde meydana gelen gelişmelerle birlikte uydu bazlı konum belirleme doğruluğu, kullanılan ölçü yöntemine bağlı olarak mm

mertebeğine ulaşmıştır. Bu durum konum bilgisini üreten, kullanan ve bu bilgiyi, ihtiyaç duyan disiplinlere koordinat, alan, yüzey, ortofoto gibi çeşitli formatlarda altlık olarak sağlayan haritacılık sektörünün faaliyet alanlarının genişlemesine ve ilerlemesine katkıda bulunmuştur. Bu sayede

tektonik hareketlerin belirlenmesi, harita mühendisliği disiplininin aktif olarak görev aldığı ve daha çok yöneldiği faaliyet alanlarından biri olmuştur.

Belirli bir bölgede gerçekleştirilen periyodik GNSS gözlemleri ile birlikte büyük ölçekli levhalara göre rölatif olarak belirlenen hızlar ile tektonik hareketleri belirlemek mümkün hale gelmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilmek istenen sonucun, büyük ölçekteki levhalar referans alınarak küçük ölçekteki levhaların hareketlerinin belirlenmesi olduğu düşünüldüğünde ve elde edilen verilerin doğruluk ölçütüne bakıldığında, jeodezik uzay teknikleri ve özellikle GNSS tekniğinin levha hareketlerinin belirlenmesi için en uygun teknik olduğu yapılan çok sayıda çalışma ile belirlenmiştir (Yavaşoğlu 2003, Tiryakioğlu vd. 2010, Tiryakioğlu vd. 2017).

GNSS gözlemleri ile tektonik hareketlerin belirlenmesi çalışma bölgesi belirlendikten sonra temelde 4 aşama olarak sınıflandırılabilir. Bunlar:

- Ağ planlaması
- GNSS gözlemleri
- Verilerin hazırlanması ve değerlendirilmesi
- Sonuçların yorumlanması

olarak ifade edilebilir.

Ağ planlaması

Ağ planlaması, yapılan çalışmanın amacına ulaşması, beklenen sonuçlara yönelik çıktılarının elde edilmesi, arazi çalışması sırasında zamandan ve bütçeden tasarruf edebilme açısından oldukça önemlidir. İyi bir ağ planlaması için iyi bir altlığa ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde altlık için MTA (Maden Tetkik Arama) diri fay haritaları, HGM Küre ve Google Earth uygulamaları kullanılmaktadır. Tektonik hareketlerin belirlenmesi amacıyla kurulacak olan ağlarda noktaların faya ve birbirlerine göre konumu, sonuçların daha anlamlı ve yorumlanabilir olması açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle bölge tektoniği ile ilgili daha sağlıklı ve homojen sonuçlara ulaşabilmek için

ağ planlaması sırasında disiplinler arası bir çalışma ile bölge blok sınırları, jeolojik yapı ve ölçme tekniği, bölgenin topografyası, fayın türü ve yönü, noktaların birbirlerine göre konumları mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır (Solak 2015).

Ağ planlaması yapılırken seçilen çalışma bölgesinde farklı kurumlar tarafından tesis edilmiş, geçmişe yönelik tesis ölçüsü ya da uzun süreli ölçüsü olan veya sabit istasyon olarak hizmet veren noktaların kullanılması hem maliyet hem de daha az ölçü ile sonuç elde edebilme açısından önemlidir. Bu nedenle Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) kontrolündeki Tusaga-Aktif (CORS-TR) ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) kontrolündeki Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı'na (TUTGA) ek olarak varsa bölgeye ait GPS/GNSS verisi araştırılmalıdır. Bu konuda ilgili kurum ve kuruluşlarla (TKGM, HGM, Devlet Su İşleri, Belediyeler, Özel sektör vb.) iletişime geçilmeli ve bölgeye ait veriler uygun protokollerle temin edilmelidir.

Tusaga-Aktif ve TUTGA verileri düzenli olarak ilgili kurumlar tarafından değerlendirildiği için RINEX (Receiver Independent Exchange Format) yapısına uygundur ve düzenli bir şekilde arşivlenir (GNSS verisi değerlendirme yazılımları RINEX formatını kullanır). Ancak diğer kurum ve kuruluşlardan elde edilen veriler binlerce, düzensiz ve tekrarlı olabilmektedir. Bu durum ağ planlaması öncesi uzun bir veri düzenleme işlemi gerektirmektedir. Bu nedenle ağın kaç noktadan oluşacağı, yeni nokta tesis edilip edilmeyeceği (eğer edilecekse yeni noktaların konumları), hangi noktaların ölçüleceği konularında karar vermek zaman almaktadır. Mevcut noktalara ait ölçü sayısı ve süresi, noktalara ait ölçü bilgileri (ölçüsü olan yıllar, kullanılan alıcı ve anten bilgisi, anten yüksekliği, tesis türü vb.) doğru, hızlı ve düzenli bir biçimde elde edilerek bir altlık üzerinde görüntülenmesi zamandan ve bütçeden tasarruf sağlamakla birlikte daha iyi bir ağ planlamasına olanak sağlamaktadır.

GNSS gözlemleri

GNSS tekniği ile levha hareketlerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak ölçüler ağ kurulduktan sonra

belirlenen noktalarda uygun ölçü stratejisi ile gerçekleştirilir. Jeodinamik amaçlar için tasarlanmış GNSS ağlarında kabuk deformasyonu çalışmalarından elde edilen GNSS hızları, elastik deformasyon hakkında önemli bilgiler sağlamakta ve tekrarlı jeodezik ölçmelerden gelen bu verilerin analizi, yer kabuğu deformasyonu çalışmalarına ışık tutmaktadır (Özener vd. 2009).

Tektonik ve deformasyon amaçlı kurulan GNSS ağlarında ölçülerden meydana gelen sapmaların belirlenmesi ve ölçüler arası korelasyonun artırılması amacıyla tekrarlı ve eş zamanlı gözlemler gerçekleştirilir. Mühendislik yapılarındaki deformasyonların ve tektonik hareketlerin belirlenmesi ve izlenmesi çalışmaları için yapılan ölçülerin doğruluğunun yüksek olması gerekmektedir. Bu nedenle bu amaçla kurulan ağlarda gerçekleştirilecek GNSS gözlemleri 4-12 saat arasında ve statik oturum şeklinde gerçekleştirilmelidir (Eckl et al. 2001, Tiryakioğlu vd. 2010). Örnek ölçü stratejisi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Örnek GNSS Ölçü Stratejisi

Parametre	Değer
Ölçü Türü	Statik
Oturum sayısı	2 gün tekrarlı
Veri toplama aralığı	15 sn
Ölçü Süresi	Min. 8 saat
Uydu yükseklik açısı	10°

Verilerin hazırlanması ve değerlendirilmesi:

Gerek çeşitli kurum ve kuruluşlardan elde edilen verilerde, gerekse yeni gerçekleştirilen GNSS gözlemlerine ait RINEX dosyalarında değerlendirme öncesi düzenleme yapılması gereken durumlar meydana gelebilmektedir. Bunlar:

- RINEX kalite kontrolü
- RINEX birleştirme
- RINEX saniye dönüştürme
- RINEX tarih düzeltme

şeklinde ifade edilebilir. GNSS verileri gerekli düzenleme işlemleri yapıldıktan sonra çeşitli

yazılımlar (Gemit/GLOBK, Bernese, GIPSY/Oasis, çevirim içi değerlendirme servisleri) yardımıyla değerlendirilir. Değerlendirme sonucunda çalışma bölgesine ait hız ve gerinim alanları üretilir.

Sonuçların yorumlanması

Değerlendirme işlemi bittikten sonra elde edilen çıktılar yardımıyla (hız, gerinim vb.) literatür bilgileri de göz önünde bulundurularak araştırmacılar tarafından bölge tektoniği hakkında yorum ve analiz sürecine geçilir. Çıktı dosyalarının formatı kullanılan yazılım ya da servise bağlı olmakla birlikte veriler sayısal olarak üretilir. Veri değerlendirme aşamasının sağlıklı olup olmadığını sayısal veriler üzerinden tespit etmek zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle elde edilen çıktılarının görselleştirilmesi, noktaların birbiri ile uyumu ve aykırı noktaların tespiti, değerlendirmede sorun olup olmadığı, güncel depremlerin meydana geldiği noktalar ve sonuçlarla ilişkisi yorumlamalar açısından oldukça önemlidir. Görsel çıktılar yorumlama sürecini hızlandırmakta ve kolaylaştırmaktadır.

Yukarıda bahsedilen işlemlerde kullanılan yazılımların kurulumu ve kullanımı ileri seviye akademik bilgi ve farklı donanımlar gerektirmektedir. Bu durum araştırmacıların (lisans, lisansüstü, akademisyenler) tektonik uygulama sürecini hem uzatmakta hem de hata olasılığını arttırabilmektedir. Bununla birlikte kullanılan ara yazılımların çalıştığı işletim sistemine bağlı olarak bilgisayarlar arası dosya taşıma gerektirebilmektedir. Bahsedilen durumlar göz önünde bulundurulduğunda bu sürecin hem çalışma hem de çalışan kişi için bir dezavantaj oluşturduğu ve bu işlemler için kolaylık sağlayacak bir sisteme ihtiyaç olduğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ilgili alanlarda çalışan tüm araştırmacıların ücretsiz olarak kullanabilmesi için yazarlar tarafından geliştirilen ve Tektonik Araçlar olarak adlandırılan, koordinat dönüşümü, RINEX düzenleme, hız, gerinim ve odak mekanizma çizimi vb. işlemleri pratik olarak gerçekleştirmeye yarayan

Python tabanlı çevirim içi bir servis geliştirilmiştir (Resim 1).

31.05.2020 | GPS Günü: 152

TEKTONİK ARAÇLAR

TEKTONİK ARAÇLAR

Anasayfa Nasıl Kullanılır? Teşekkürler Yardımcı Scriptler

KML Üretme

- KML Üretme
- Meta KML Üretme

GMT ile Çizim

- Nokta Çizme
- Hız Çizme
- Strain Çizme
- Odak Mekanizma Çizme

Koordinat Dönüşümü

- WGS84'den Coğrafiye
- GRS80'den Coğrafiye
- ED50'den Coğrafiye

RINEX İşlemleri

- Birleştirme
- Saniye Dönüşümü
- Kalite Kontrol

Resim 1. Geliştirilen servise ait ekran görüntüsü

2. Sistem altyapısı

2.1 Sunucu

Geliştirilen çevirim içi servis için 2 core CPU, 4 GB Ram özelliklerinde ve Ubuntu 18.04 işletim sistemine sahip sunucu kullanılmaktadır.

2.2 Python

Python, ücretsiz, açık kaynak kodlu, nesne tabanlı, yorumlamalı, yüksek seviyeli ve çok geniş kütüphaneleri içeren bir programlama dili olup girintilere dayalı basit sözdizimi, dilin öğrenilmesini ve akılda kalmasını kolaylaştırır. Hollandalı bir programcı olan Guido Van Rossum tarafından 1990'lı yıllarda geliştirilmiştir. Google, Dropbox vb. çok sayıda uluslararası kuruluş tarafından etkin olarak kullanılan Python dilinin bazı temel özellikleri:

- Hızlı program yazmayı, gömülü sistemlere etkin bir şekilde entegre olmayı sağlar.
- Platformdan bağımsızdır ve bu sayede Linux, Windows vb. tüm işletim sistemleri üzerinde çalışabilmektedir.
- Açık kaynak kodlu bir yazılımdır.
- Geniş ve işlevsel kütüphanelere sahiptir.
- Makine öğrenmesi vb. çalışmalarda etkin olarak kullanılmaktadır.
- Gelişmiş modülleri sayesinde (Scipy, Numpy vb.) bilimsel çalışmalarda kullanılmaktadır (İnt Kyn. 1).

2.3 Flask

Flask, Python programlama diliyle yazılmış güçlü, esnek, bir web uygulama geliştiricisidir (framework). Diğer frameworklere göre (Django, Web2pay, Turbogears vb.) daha basit ve kolay anlaşılır bir yapıda olması nedeniyle çok sayıda kullanıcısı vardır. Microframework olan Flask, hızlı web uygulamaları geliştirmede oldukça büyük bir öneme sahiptir (İnt Kyn. 2).

2.4 Generic Mapping Tools (GMT)

Çoğunluğu yer, atmosfer ve okyanus bilimleriyle uğraşan disiplinler olmakla birlikte veri görselleştirmeye ihtiyaç duyulan tüm disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk olarak Prof. Paul Wessel ve Prof. Walter Smith tarafından 1988 yılında geliştirilmiştir. GMT açık kaynak programcılığı felsefesini temel alan, coğrafi verileri işleyen, filtreleyen, gridleyen ve bir harita projeksiyonuna değişik görselleştirme yöntemleriyle 2 ve 3 boyutlu olarak aktaran ve 30'dan fazla harita projeksiyonu desteğine sahip bir programdır. Komut satırından çalışması nedeniyle çok esnek bir yapıya sahiptir. Kullanım için bir ara yüze sahip olmaması nedeniyle profesyonel olmayan kullanıcılar açısından vakit alıcı olabilmektedir (Wessel et al. 2013, İnt Kyn. 3).

2.5 Translating Editing and Quality Check (TEQC)

TEQC Dr. Lou Estey tarafından geliştirilmiş, RINEX veya BINEX formatında GPS, GLONASS, Galileo, SBAS, Beidou, QZSS ve IRNSS verileri üzerinde kalite kontrolü, birleştirme vb. çok sayıda işlemi yapmaya yarayan bir programdır (Estey and Meertens, 1999, İnt Kyn. 4).

2.6 Hypertext Markup Language (HTML)

HTML yazı, video veya görsel öğelerin sayfa içerisine yerleştirilmesine ve istenildiği gibi konumlandırılmasını sağlayan bir işaretleme dilidir. Aynı zamanda hazırlanan sayfaların web tarayıcısında düzgün bir şekilde görülmesini sağlar. Hazırlanan kodlar web tarayıcıları tarafından anlaşılabilir şekilde görsel web sayfalarına dönüştürülür. Bununla birlikte girilen web sitesi hakkında arama motorlarına bilgi verilmesini sağlar. Bir programlama dili değildir (İnt Kyn. 5).

3. Sistem çalışma prensibi

Sistem GNSS ile tektonik hareketlerin belirlenmesi sürecinde kullanıcıya 4 temel aşamada katkı sağlamaktadır. Bunlar:

- Mevcut RINEX verilerinin listelenmesi
- Noktaların Google Earth ortamına aktarılması
- Verilerin değerlendirmeye hazır hale getirilmesi
- Çıktıların görselleştirilmesi

olarak tanımlanabilir. Bu aşamalara ek olarak kullanıcının ihtiyaç duyabileceği yardımcı scriptler servis üzerinde “Yardımcı Scriptler” sayfasına listelenmiştir (RINEX veri listeleme, RINEX tarih düzeltme, I-file üretme (Gamit/GLOBK), dosya adı küçültme, Post Script (ps) dosyalarını PDF’e çevirme).

3.1 Mevcut RINEX verilerinin listelenmesi

Ağ planlaması öncesinde çalışma bölgesine ait eski verilerin temini daha doğru ve hassas sonuçlar, bütçe, arazi çalışması süresi vb. konularda avantaj sağlamaktadır. Bu aşamada kullanıcının temin edebileceği eski veri sayısı büyük önem arz etmektedir. Hiç veri olmayabileceği ya da çok az

veri olabileceği gibi binlerce veri bulmakta mümkündür. Temin edilen verilerin konum bilgisi, ölçü süresi, nokta tesis tipi, anten yüksekliği, alıcı ve anten türü bilgilerine göre filtrelenmesi ve çalışma bölgesindeki konumlarına göre ağ planlamasında kullanılıp kullanılmayacağına belirlenmesi gerekmektedir.

Binlerce verinin sunucu tarafına taşınıp filtrelenmesi mümkün olmadığı için bu işlemi verilerin bulunduğu bilgisayar ortamında hızlı bir şekilde yapacak bir RINEX listeleme programı geliştirilmiştir. Kullanıcı “Yardımcı Scriptler” sayfasından indirdiği RINEX veri listeleme scriptini RINEX verilerinin bulunduğu ana klasörde çalıştırması durumunda tüm alt klasörlerde yer alan veriler nokta adı, x, y, z, alıcı türü, anten tipi, anten yüksekliği, ölçü tarihi, ölçü süresi, dosya yolu sıralamasıyla yeni oluşturulacak ‘verilistesi.txt’ dosyasında listelenecektir.

3.2 Noktaların Google Earth Ortamına Aktarılması

Listelenen verilerin Google Earth / HGM Küre üzerindeki dağılımını görebilmek için üretilen txt dosyasındaki x, y ve z sütunlarında yer alan koordinatların servis üzerinde yer alan “Koordinat Dönüşümü” sayfasında belirtilen şekilde coğrafi koordinatlara dönüştürülmesi gerekmektedir.

Sonraki aşamada ise txt dosyası servis üzerinde yer alan “Meta KML Üretme” sayfasına yüklenir ve tüm noktaların ve noktalara ait bilgilerin olduğu KML dosyası indirme bağlantısı yardımıyla indirilir. İndirilen dosya Google Earth ya da HGM Küre uygulaması ile açıldığında herhangi bir noktaya tıklanarak nokta ile ilgili tüm bilgiler görüntülenebilir (nokta adı, x, y, z, alıcı türü, anten tipi, anten yüksekliği, ölçü tarihi, ölçü süresi, dosya yolu).

3.3 Verilerin Değerlendirmeye Hazır Hale Getirilmesi

Kullanıcı ağ planlaması sonrası arazide GNSS gözlemlerini gerçekleştirdikten sonra eski ve yeni tüm verilerin değerlendirme için hazırlanması

gerekmektedir. Bu noktada RINEX birleştirme, saniye dönüşümü ve kalite kontrolü işlemleri servis üzerinde yer alan “RINEX İşlemleri” kısmından yapılabilir.

3.4 Çıktıların Görselleştirilmesi

Değerlendirme sonrası nokta, hız, gerinim ve odak mekanizma çözümü parametreleri servis üzerinde yer alan “GMT ile Çizim” sayfasından görselleştirilebilir. Bu aşamada çıktıda yer alması istenilen bilgilere ait dosyaların belirtilen formatlarda (org, gmt, txt, dat) yüklenmesi gerekmektedir. Sadece nokta ya da nokta, gerinim ve odak mekanizma çözümü vb. olmak üzere çıktı görselinde olması istenilen dosyaların yüklenmesi yeterlidir. Dosya yükleme işleminden sonra renk, kalınlık, uzunluk, büyüklük ve ölçek bilgileri istenilen şekilde seçilir ve çizim işlemi yapılır. Yapılan çizim gereken/istenilen değişikliklerin yapılabilmesi için önce kullanıcıya ekranda gösterilir. Bu sayede kullanıcı son şeklini verene kadar herhangi bir indirme işlemi yapmak durumunda kalmaz. Üretilen çıktı kullanıcıya ps, pdf, jpg ve png olmak üzere yüksek çözünürlükte ve 4 farklı formatta sunulur.

4. Uygulama

RINEX verilerinin listelenmesi, koordinat dönüşümü ve Meta KML üretme fonksiyonlarını test etmek için düzensiz ve farklı klasör/alt klasörlerde bulunan 20 noktaya ait 100 RINEX dosyası seçilerek gereken işlemler belirtilen sırayla uygulanmıştır. Veri görselleştirme için (Aktuğ 2009)’da ve hız verisi olan noktalardan 29 tanesi seçilmiştir. (Çizelge 2) Gerinim verisi ise yine bu hızlar kullanılarak

Geodsuit v3.2 yazılımı ile üretilmiştir. Deprem odak çözümü için rastgele konum ve büyüklük tanımlanmıştır.

Çizelge 2. Görselleştirmede kullanılan hızlar (mm/yıl) (Aktuğ et al. 2009)

Boylam	Enlem	Ve	Vn	Se	Sn	RHO	Nokta
28,01	38,96	-22,89	-8,96	0,77	0,74	0,1	akhi
28,483	38,315	-22,61	-13,18	0,86	0,8	0,1	alse
26,406	36,586	-14,23	-30,03	0,61	0,54	0,1	astp
27,308	38,711	-17,44	-14,74	0,69	0,65	0,1	bayo
27,423	37,032	-15,96	-26,08	0,6	0,52	0,1	bodr
28,23	38,07	-21,41	-13,97	0,62	0,66	0,1	byda
27,836	37,196	-17,58	-24,98	0,57	0,52	0,1	camk
26,385	38,311	-18,32	-22,88	0,48	0,48	0,1	ceil
27,96	37,63	-20,45	-21,6	0,67	0,69	0,1	cinc
28,081	37,609	-20,64	-21,16	0,43	0,4	0,1	cine
27,38	37,88	-21,32	-20	0,67	0,69	0,1	cmlk
28,826	36,762	-15,44	-20,07	0,6	0,56	0,1	dlmn
28,99	38,51	-22,64	-7,49	0,55	0,55	0,1	esme
26,085	38,443	-19,07	-22,96	0,65	0,59	0,1	hios
28,82	38,34	-24,12	-10,71	0,58	0,62	0,1	hrdl
27,394	36,681	-11,85	-29,9	0,58	0,54	0,1	knid
26,929	36,752	-15,88	-26,53	0,65	0,56	0,1	kosi
28,74	38,57	-23,31	-9,68	0,64	0,64	0,1	kula
27,963	36,772	-14,23	-25,98	0,53	0,48	0,1	marm
26,72	38,43	-19,35	-12,86	1,01	1,01	0,1	mnts
28,427	37,175	-17,91	-20,94	0,51	0,51	0,1	mula
28	38,248	-20,62	-12,62	0,84	0,78	0,1	odme
27,085	38,019	-20,01	-19,68	0,62	0,55	0,1	ozde
26,989	37,78	-18,97	-23,89	0,63	0,55	0,1	samo
27,486	37,818	-19,66	-18,98	0,82	0,78	0,1	soke
28,58	37,58	-22,53	-17,56	0,59	0,62	0,1	thrn
27,61	38,26	-22,15	-17,16	0,59	0,62	0,1	uctp
26,74	38,38	-22,92	-20,31	0,67	0,75	0,1	uris
26,79	38,74	-23,26	-17,48	0,77	0,92	0,1	yenf

4.1 Mevcut RINEX verilerinin listelenmesi

RINEX dosyalarının bulunduğu ana klasörde listeleme programı çalıştırılarak alt klasörlerde yer alan ve farklı uzantılara sahip olan (RINEX, navigasyon, meteoroloji, txt, xls, doc, pdf vb.) toplam 300 dosya içerisinde yalnızca RINEX gözlem dosyaları başarıyla listelenmiştir. (Resim 2)

1	istasyon,X,Y,Z,alicituru,antentipi,antenyuksekligi,olcutarihi,olcusuresi,dosyayolu
2	akts,4718223,3304,2156224,9085,4000981,0859,Z-MAX0A01,ANT,0.0000,14/9/2018,9.65,C:\Users\Casper\Py
3	hmdy,4721640,9169,2122250,1696,4018241,4512,Z-MAX0A01,ANT,0.0000,14/9/2018,7.7,C:\Users\Casper\Py
4	kert,4715270,5772,2145147,4309,4010294,4170,THALESZ-MAX,THALES,0.0830,14/9/2018,7.07,C:\Users\Cas
5	ertu,4707151,0627,2106548,3328,4041581,9723,LEICAGX1230GG,LEIAX1202,0.1800,8/6/2009,8.48,C:\Users
6	ertu,4707151,0627,2106548,3328,4041581,9723,LEICASR530,LEIAT502,0.1800,21/10/2008,7.92,C:\Users\C
7	ertu,4707149,7405,2106547,9898,4041579,2406,LEICASR9500,LEIAT302-GP,0.1800,24/10/2008,4.68,C:\Use
8	ahmb,4834285,0101,2116195,3132,3905374,1534,Topcon-Unknown-,TPSHIPER_PRO,0.0800,30/3/2016,4.3,C:\
9	ahmb,4834288,6002,2116196,7720,3905374,7243,TPSHIPER,TPSHIPER_PLUS,0.0770,29/8/2009,5.22,C:\Users\C
10	ardc,4718228,9001,2107259,6533,4030548,3157,TPSHIPER,TPSHIPER_GD,0.0800,1/4/2007,1.97,C:\Users\C
11	ardc,4718227,3432,2107259,6219,4030549,8388,LEICAGX1230GG,LEIAX1202,0.2000,22/10/2008,6.75,C:\Use
12	ardc,4718227,3432,2107259,6219,4030549,8388,LEICASR9500,LEIAT302-GP,0.1800,25/10/2008,9.3,C:\User
13	ardc,4718227,2833,2107259,6105,4030549,7969,TPSHIPER2.5Jun222005p1,TPSHIPER_PLUS,0.0800,30/11/200
14	bgdc,4701314,2364,2142255,2422,4025483,9245,TPSHIPER,TPSHIPER_GGD,0.0850,7/8/2008,4.37,C:\Users\C
15	bgdc,4701313,2103,2142254,3377,4025484,2173,TPSHIPER2.6Mar162006,TPSHIPER_PLUS,0.0880,3/12/2006,2
16	bsyl,4795776,7668,2107669,8597,3951771,0438,TPSHIPER,TPSHIPER_GGD,0.0840,22/2/2010,2.87,C:\Users\
17	bsyl,4795776,8256,2107668,8654,3951770,5999,TPSHIPER,TPSHIPER_GGD,0.1120,30/3/2010,1.77,C:\Users\
18	bsyl,4795776,1639,2107669,2390,3951770,6993,TPSHIPER,TPSHIPER_GGD,0.0820,24/8/2009,10.22,C:\Users

Resim 2. Listeleme programı ile listelenen veriler

4.2 Noktaların Google Earth Ortamına Aktarılması

Üretilen txt dosyasındaki x, y ve z sütunlarında yer alan Kartezyen Koordinatlar coğrafi koordinatlara servis üzerinden dönüştürülmüştür (Resim 3-4). Veri listesinin son hali servis üzerinden Meta KML dosyasına dönüştürülmüştür (Resim 5-6).

Dönüşüm Türü:

WGS84 -> Coğrafi GRS80 -> Coğrafi ED-50 -> Coğrafi

Girilen Veri Formatı:

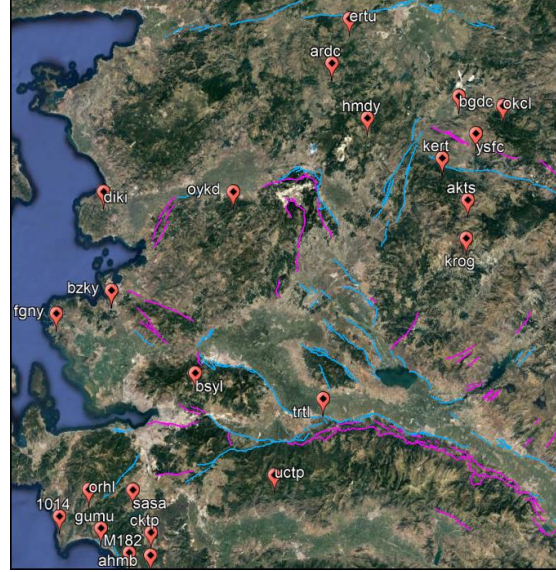
NoktaAdi,X,Y,Z X,Y,Z

```
4368725.3059 2343722.7266 4000981.0859
4371889.7379 2306793.6626 4018241.4512
4365991.2752 2331681.9901 4010294.4170
4358473.2062 2289726.4487 4041581.9723
4358473.2062 2289726.4487 4041581.9723
4358471.9819 2289726.0759 4041579.2406
4476189.8242 2300212.2970 3905374.1534
4476193.1483 2300213.8826 3905374.7243
4368730.4631 2290499.6231 4030548.3157
4368729.0215 2290499.5890 4030549.8388
```

Resim 3. Koordinat Dönüşüm Ekranı

```
39.0925304813 28.2125559623 1088.11011006
39.2958293546 27.8180218491 717.648206859
39.2035934586 28.1046947197 691.881414078
39.5715915838 27.7152173599 232.872389975
39.5715915838 27.7152173599 232.872389975
39.5715798323 27.7152201456 230.163083254
37.9984534239 27.1976022209 106.328514797
37.9984370591 27.1976009797 109.580939762
39.4408220226 27.6677576726 498.49517179
39.4408400121 27.6677650971 498.464522151
```

Resim 4. Dönüştürülmüş Koordinatlar



Resim 5. KML Ekran Görüntüsü

oykd	
Z	694.538247086
alicituru	LEICASR530
antentipi	AT502
antenyuksekligi	0.1900
olcutarihi	13/3/2007
olcusuresi	4.07
dosyayolu	C:\Users\Casper\Pvc\harm\Projects\OYKDT\oykd0720.07o

Yol Tarifi: [Buraya](#) - [Buradan](#)

Resim 6. Noktalara ait bilgiler (Meta)

4.3 Verilerin Değerlendirmeye Hazır Hale Getirilmesi

Ağ planlaması yapıldıktan sonra RINEX verileri içerisinde ihtiyaç duyulanlar için birleştirme, saniye dönüştürümü ve kalite kontrolü işlemleri yapılmıştır (Resim 7).

SANİYE DÖNÜŞÜMÜ	
Rinex dosyası (*.o):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> akts2570.18o
Kaç Saniyeye Dönüşecek:	<input type="text" value="30"/>
KALİTE KONTROLÜ	
Rinex dosyası (*.o):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> akts2570.18o
RINEX BİRLEŞTİRME	
1. Rinex dosyası (*.o):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> akts2570.18o
2. Rinex dosyası (*.o):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> akts2571.18o

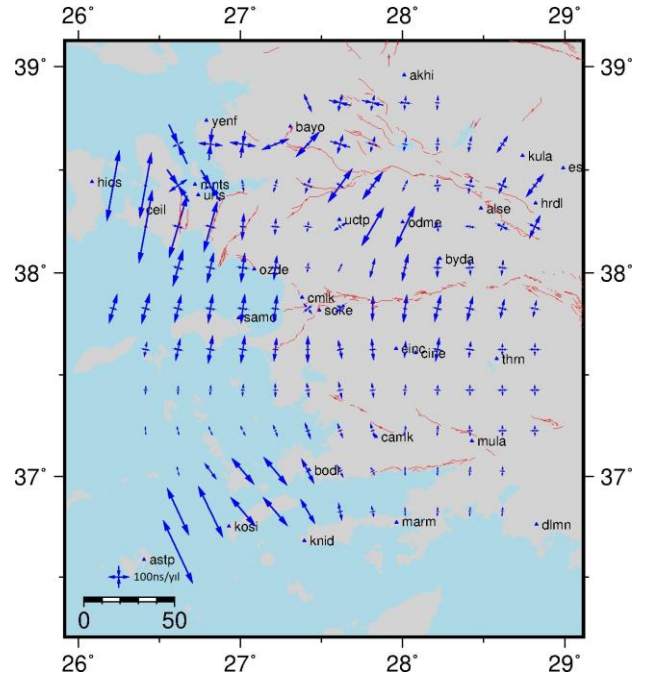
Resim 7. RINEX İşlem Listesi

4.4 Çıktıların Görselleştirilmesi

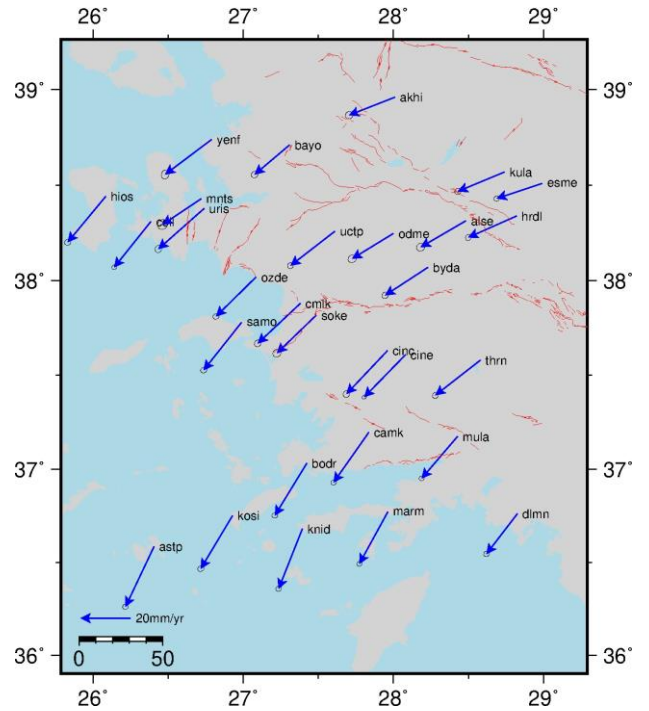
Seçilen noktalara ait hızlar ve bu hızlardan üretilen gerinim alanları servis üzerinden görselleştirilmiştir (Resim 8, Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3). Görselleştirme için kullanılan enlem boylam sınırları girdi dosyalarından okunmakta olup $\pm 0.3^\circ$ geniş alınmaktadır.

Nokta Dosyası (org/gmt/txt):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> Dosya seçilmedi
Hız Dosyası (org/gmt/txt):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> Dosya seçilmedi
Strain Dosyası (gmt):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> Dosya seçilmedi
Odak Mekanizma Dosyası (dat):	<input type="button" value="Dosya Seç"/> Dosya seçilmedi
Ölçek (Jm):	<input type="text" value="5"/>
Nokta Sembol Tipi:	<input type="button" value="Üçgen"/>
Nokta Sembol Rengi:	<input type="button" value="Mavi"/>
Nokta Sembol Boyutu:	<input type="text" value="0,08"/>
Nokta Yazı Rengi:	<input type="button" value="Mavi"/>
Nokta Yazı Boyutu:	<input type="text" value="5"/>
Hız Oku Rengi:	<input type="button" value="Mavi"/>
Hız Oku Uzunluğu:	<input type="text" value="0,04"/>
Hız Oku Kalınlığı:	<input type="text" value="0,02"/>
Strain Oku Rengi:	<input type="button" value="Mavi"/>
Strain Oku Uzunluğu:	<input type="text" value="0,003"/>
Strain Oku Kalınlığı:	<input type="text" value="0,02"/>
Odak Mekanizma Büyüklüğü:	<input type="text" value="0,5"/>
Odak Mekanizma Rengi:	<input type="button" value="Mavi"/>

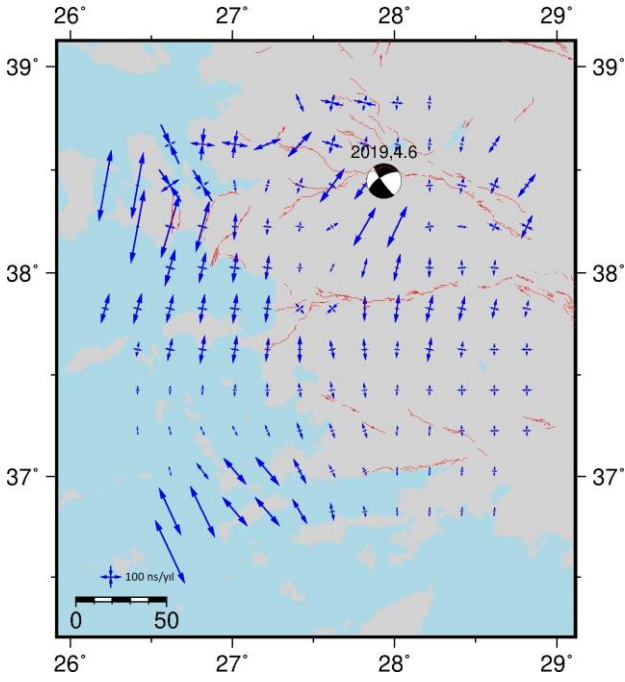
Resim 8. Veri görselleştirme sayfası ekran görüntüsü



Şekil 1. Gerinim çizimi



Şekil 2. Hız çizimi



Şekil 3. Nokta, gerinim ve odak mekanizma çözümü

5. Sonuçlar

GNSS teknolojisinin gelişmesiyle birlikte uydular yardımı ile konum belirlemede daha doğru ve hassas konum bilgisi elde etmek mümkün hale gelmiştir. Bu durum konum bilgisini kullanan disiplinlerde gerçekleştirilen çalışmaları çeşitlendirmiştir. Konum bilgisi üreten, bu bilgiyi çeşitli alanlarda kullanan ve ihtiyaç duyan disiplinlere sunan Haritacılık disiplini de bu gelişmelere paralel olarak gelişmektedir. GNSS ölçüleri ile birlikte tektonik hareketleri belirlemek buna örnek olarak verilebilir.

GNSS ölçüleri ile tektonik hareketleri belirleme süreci genel olarak ağ planlaması, GNSS gözlemleri, verilerin değerlendirilmesi ve sonuçların yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalar gerçekleştirilirken çok sayıda ara işlemin manuel olarak yapılması ve yardımcı programların kullanılması gerekmektedir. Bu durum süreci uzatmakla birlikte hatalara neden olabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ilgili alanlarda çalışan tüm araştırmacıların herhangi bir ara program ya da yazılım dili bilmeksizin bahsedilen işlemleri pratik olarak gerçekleştirmesi için Python tabanlı çevirim içi bir servis geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen servise ek olarak kullanıcıların Tektonik Uygulama sürecinde karşılaşılabilecekleri mikro

sorunlar için yardımcı scriptler geliştirilmiş ve servis web sitesi üzerinden sunulmuştur. Geliştirilen servis bir amaca yönelik olarak gerçek verilerle birlikte test edilmiş ve elde edilen tüm sonuçlar paylaşılmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde geliştirilen servisin sorunsuz çalıştığı ve tektonik uygulama sürecini önemli ölçüde hızlandırdığı değerlendirilmiştir. Servis 193.255.49.96 IP adresinden ücretsiz olarak ilgili alanlardaki tüm araştırmacıların kullanımına açıktır. Kullanıcılar tarafından yapılan geribildirimlerle birlikte servisin geliştirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Altyapı için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı'na, kullanılan araçlar için Python, Flask, Gamit/GLOBK, GMT, HTML geliştiricilerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Aktuğ, B., Nocquet, J.M., Cingöz, A., Parsons, B., Erkan, Y., England, P., Lenk, O., Gürdal, M.A., Kılıçoğlu, A., Akdeniz, H., and Tekgül, A., 2009. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behaviour. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B10404, doi: 10.1029/2008JB006000.
- Eckl, M.C., R. Snay, T. Soler, M.W. Cline & G.L. Mader, 2001. Accuracy Of GPS-Derived Relative Positions As A Function Of Interstation Distance And Observing-Session Duration. *Journal Of Geodesy*, **75 (12)**, 633-640.
- Essey, L.H., ve Meertens C.M., 1999. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data, GPS Solutions, *John Wiley & Sons, Inc.*, **3 (1)**, pp. 42-49.
- Özener, H., Doğru, A., 2009. Jeodezik ve Sismik verilerden Yararlanarak Kabuk Deformasyonu Alanının Belirlenmesi. *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 2009/3 Özel Sayı 96-102.
- Solak, H. İ., 2015, GNSS Hızları İle Güneybatı Anadolu'daki Gerinim Alanlarının Zamansal Değişimi,

Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 95.

Tiryakioğlu, İ., Dereli, M.A., Erdoğan, S., Gülal, E., "Tektonik Hareketlerin Belirlenmesine Yönelik Ölçü Kampanyalarında GNSS Gözlem Sayı ve Sürelerinin Konum Doğruluğuna Olan Etkilerinin Araştırılması". *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2010, **2 (2)** 32-38.

Tiryakioğlu İ., Gulal E., Solak H.I., Ozkaymak C. (2018) Crustal Deformation Modelling by GNSS Measurements: Southwestern Anatolia, Turkey. In: Kallel A., Ksibi M., Ben Dhia H., Khélifi N. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development).

Yavaşoğlu, H., 2003, Kuzey Anadolu Fayının Orta Bölümünün Kinematığının 2001 ve 2002 GPS Ölçmeleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 64.

Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe, Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, **94 (45)**, p. 409–410, 2013. doi:10.1002/2013EO450001.

İnternet kaynakları

- 1- <https://python.org>
- 2- <https://palletsprojects.com/p/flask/>
- 3- <http://www.atag.itu.edu.tr/GMTtr/>
- 4- <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>
- 5- <https://www.w3schools.com/html/>

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045503 (623-633)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045503 (623-633)

DOI: 10.35414/ akufemubid.711653

Araştırma Makalesi / Research Article

Burdur Gölü Kıyı Şeridindeki Değişiminin Uzaktan Algılama ile Haritalanması

Aslı SABUNCU¹¹Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Jeodezi Anabilim Dalı Üsküdar, İstanbul, Türkiye.e-posta: asli.turgutalp@boun.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-6628>

Geliş Tarihi: 30.03.2020

Kabul Tarihi: 30.08.2020

Öz

Burdur Gölü, Türkiye'nin güneybatısındaki Isparta ve Burdur illeri arasında yer almaktadır. Tektonik kökenli ve alkali yapıda olan Burdur gölünün suyu tuzludur. Göl aynı zamanda birçok farklı kuş türü için önemli sulak alan için Ramsar alanı olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, Burdur Gölü'nün kıyı şeridinin yıllar içindeki konumsal değişimlerini uzaktan algılama yaklaşımları kullanarak analiz etmektir. Bu amaç doğrultusunda dört adet çok zamanlı Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI uydu görüntüleri çalışmanın uygulama safhasında kullanılmıştır. Belirli bir zaman aralığında ve bölgede meydana gelen değişimleri izlemek için, En çok benzerlik ve Destek Vektör Makinesi (DVM) gibi piksel tabanlı görüntü sınıflandırmasını kullanmak, belirtilen zaman aralığı arasındaki değişiklikleri doğru bir şekilde izlemek için etkili bir yoldur. Piksel tabanlı sınıflandırma uygulamalarının yanı sıra, su kütlesi alanının çıkarılması ve bu alanların CBS platformunda sayısallaştırılması için Modifiye Normalize Fark Su İndeksi (MNDWI) kullanılmıştır. Tüm sınıflandırma sonuçları ile MNDWI indis sonuçları Burdur Gölü'nün su yüzey alanı % 40'ını kaybettiğini ve Burdur Gölü'nün toplam alanının 1986'da 206 km² iken şu anda 125 km² olduğunu göstermiştir. Uygulanan uzaktan algılama yöntemleri ile Burdur Gölü'nün 1986-2019 yılları arasında yüzey alanında önemli bir azalma eğilimi olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler

Burdur Gölü; DVM Sınıflandırma; En Çok Benzerlik Sınıflandırma; MNDWI; Landsat 5; Landsat 8

Mapping Burdur Lake Shoreline Changes Using Remote Sensing

Abstract

Burdur Lake is situated between the provinces of Isparta and Burdur in the southwest of Turkey. It is an alkaline and saline lake with tectonic origin. The lake is also designated as RAMSAR site for significant wetland site for many different bird species. The main objective of this study is to analyze the spatial changes of Burdur Lake by using remote sensing approaches. Four multi-temporal satellite images of Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI were used to monitor and map the shoreline changes for the lake. Using pixel based image classification including maximum likelihood and Support Vector Machine (SVM) are the effective way in order to monitor the changes between specified time interval accurately. Besides pixel based classification applications, spectral water indexes including Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) were used for the extraction of the water body area and digitize these areas in the GIS platform. The results of all classifications and MNDWI indice indicated that Burdur Lake lost its % 40 of water body surface and the total area of Burdur lake was 206 km² in 1986 and now is 125 km². Burdur lake based on the applied methods bring out a significant diminishing trend in surface area between the time period of 1986 and 2019 in this study.

Keywords

Burdur Lake; SVM Classification; Maximum Likelihood Classification; MNDWI; Landsat 5; Landsat 8

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Kıyı şeridi; deniz, tabii ve suni göl ve akarsuların veya bir su kütlesinin kenarının kara ile birleşmesi ile oluşan çizgi olarak tanımlanmaktadır. Kıyı şeridi

boyunca meydana gelen değişiklikler temel olarak insan, iklim ve doğal afet kaynaklı olmaktadır (Aouiche et al., 2016; French, 2001; Pardo-Pascual et al., 2012). Ayrıca, tabii ve suni göllerdeki kıyı

şeridinin ani olarak değişimi, tarım ve hayvancılık için gereksiz su kullanımı, göl çevresinde meydana gelen hızlı kentleşme, turistik yapılaşma, ormansızlaştırma faaliyetleri gibi antropojenik faaliyetler sonucu meydana gelmektedir (Du et al. 2001, Yan et al. 2002, Penny and Kealhofer 2005, Legesse and Ayenew 2006, Kiage et al. 2007, Aykut 2019). Kıyı şeridi değişiklikleri aynı zamanda sadece suyun kalitesini değil, göl suyu ve çevresini de etkilemektedir (Aladin et al., 2005, Timoshkin et al., 2016, Babich et al, 2016). Kıyı şeridi çizgisinin belirlenmesinde harita mühendisliğinin farklı ölçme yöntemleri dünyada ve ülkemizde uzun yıllardır uygulanmakta olup uzun yıllar boyu araştırma konusu olmuştur. Bu yöntemler; klasik ölçme (Ingham, 1992), yersel ve hava fotogrametrisi (Güney ve Polat, 2015), uzaktan algılama (Saroğlu vd., 2005; Bayram vd., 2017; Jahncke vd., 2018) ve LIDAR (Almeida vd., 2015; Andriolo vd., 2018) çalışmaları olup bu yöntemler ile elde edilmiş veriler kıyı kenar çizgisi çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, Bayram, vd. (2016) IHA-LIDAR ve IHA-Kamera verileri kullanarak otomatik kıyı çizgisi çıkartılmasına yönelik bir çalışmaları mevcuttur. Yoo ve Oh (2016) ise yaptıkları çalışmada IHA-Kamera sistemini kullanarak kıyı erozyonunun üç boyutlu (3B) belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır.

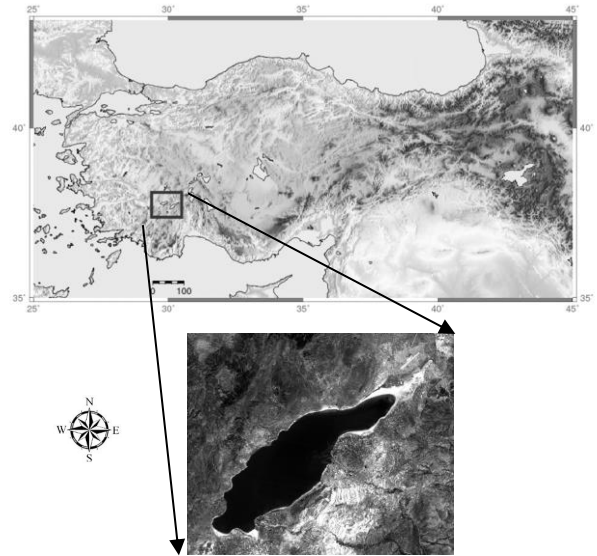
Son yirmi yılda, uzaktan algılamanın farklı yaklaşımlarının ortaya çıkmasıyla, Türkiye'deki göllerin kıyı şeridinin tespit edilmesi, kıyı kenar çizgilerindeki zamansal ve mekansal olarak değişiminin tespit edilmesi ile ilgili çok çeşitli çalışmalara rastlamak mümkündür. Bu çalışmalardan bazıları Uluabat Gölü (Tagil 2007), Tuz Gölü (Ormeci ve Ekercin, 2007), Eğirdir Gölü (Kalkan vd. 2013), Acıgöl Gölü (Temiz ve Durduran 2016), Burdur Gölü (Yıldırım ve Uysal 2011, Sarp ve Özçelik 2016, Davraz vd. 2019), Sapanca Gölü (Duru 2017) olup bu çalışmalarda uydu görüntüleri kullanılarak kıyı şeridinde ve çevresinde zaman içinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Burdur Gölü kıyı şeridinde 1986 - 2019 yılları arasında meydana gelen değişimin çok zamanlı Landsat uydu verileri kullanılarak uzaktan algılama yaklaşımları ile

belirlenmesidir. Kullanılan uzaktan algılama algoritmaları, en çok benzerlik sınıflandırması, destek vektör makineleri sınıflandırması ve modifiye normalize fark su indeksidir. Bu uygulamalar ile sonuçlar ayrıca karşılaştırılmış ve uzaktan algılama yöntemlerinin bu tür araştırmalarda ne kadar etkili olduğu görülmüştür.

2. Çalışma Bölgesi

Bu çalışmada, 1986-2019 yılları arasında Burdur Gölü kıyı şeridi değişimleri uydu görüntüleri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma bölgesinin koordinatları $37^{\circ} 36' 5.11'' - 37^{\circ} 57' 26.77''$ K ve $29^{\circ} 41' 27.37'' - 30^{\circ} 25' 16.87''$ D'dur (Şekil 1). Burdur Gölü, Türkiye'nin güneybatısında Isparta ve Burdur illeri arasında bulunan tektonik kökenli bir göldür. Türkiye'de yer alan göller arasında yedinci en büyük ve tuzlu göller arasında ise üçüncü sırada yer almaktadır. Burdur Gölü Türkiye'de tespit edilmiş olan 14 Adet Ramsar alanı içinde yer alan bir göldür. Ayrıca Burdur Gölü su kuşları için önemli bir barınma, üreme noktaları arasında yer almaktadır. Her kış, gölde 300.000'e kadar kuş konaklamaktadır (İnt. Kayn1 , 2020). Burdur gölü kapalı havza özelliğine sahip olup suyun kaynağı; akiferlerden mevsimsel, yeraltı akışı ve yağış ile yüzey akışları ile şarj edilmektedir. Göl suyunun azalmasının ana nedeni ise buharlaşmadır (Davraz vd. 2019).



Şekil 1. Çalışma bölgesinin haritası ve Burdur Gölü'nün pankromatik moda Landsat 5 görüntüsü.

3. Veri Seti

Çalışmada, 1986-2019 yılları arasında, Burdur Gölü kıyı şeridinde meydana gelen konumsal değişikliklerini tespit etmek için çalışma alanına ait iki farklı veri seti kullanılmıştır. İlk veri seti, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar kurumunun (USGS) web sitesinden indirilen Landsat uydu görüntüleridir (İnt. Kayn 2 ,2019). Çizelge 1’de, bu çalışmada kullanılan Landsat uydu verilerinin teknik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 1.Uygulamada kullanılan veri setine ait alım tarihleri.

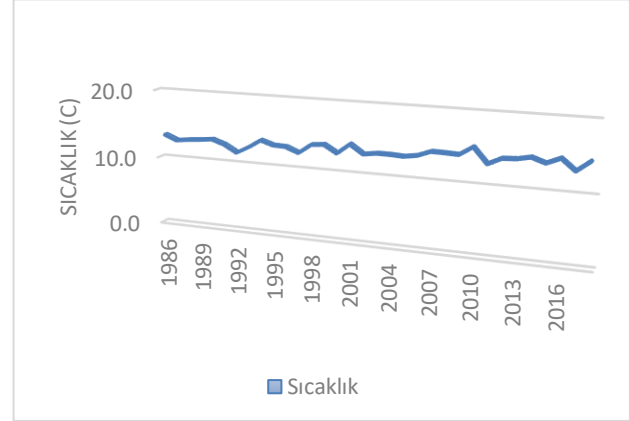
Burdur Gölü		
Alım Tarihi	Uydu/Sensör	Yörünge/Dizi
20 Haz 1986	Landsat 5/TM	178/034
25 Haz 1997	Landsat 5/TM	179/034
23 Haz 2008	Landsat 5/TM	179/034
08 Tem 2019	Landsat 8/OLI	179/034

Uzaktan algılama analizlerinde 20 Haziran 1986, 25 Haziran 1997 ve 23 Haziran 2008 tarihlerine ait üç adet Landsat 5 TM ve 08 Temmuz 2019 tarihine ait bir adet Landsat 8 OLI / TIRS verisi kullanılmıştır. Uydu görüntüleri web sitesinden indirilirken görüntünün bulutluluk oranının sıfır olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca fenolojik ve hidrolojik etkileri en aza indirmek için tüm uydu görüntüleri aynı mevsimlerde alınmıştır.

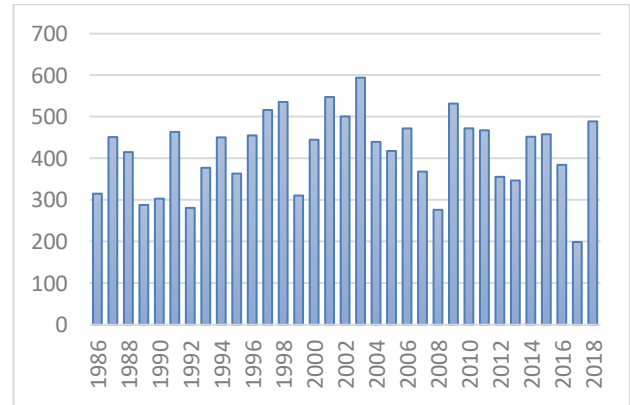
İndirilmiş olan ham uydu görüntülerine ön işleme adımları uygulanmıştır. Bu ön işlem adımları sırası ile bantların birleştirilmesi (Layer stacking), belirlenmiş olan çalışma alanının birleştirilmiş görüntüden kesilmesi (subset), geometrik ve radyometrik düzeltmedir. Bahsedilen ön işlem adımları tamamlandıktan sonra sınıflandırma ve indeks adımına geçilmiştir.

İkinci veri seti ise, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Meteoroloji Laboratuvarı'ndan alınan Burdur Gölü çevresine ait 1986 yılından 2018 yılına kadarki süreçte yağış ve sıcaklık verisini içeren meteorolojik veridir. Çalışma bölgesine konum olarak en yakın olan Burdur istasyonunun 1986-2018 yılları arasında kaydettiği yağış ve sıcaklık değişimleri sırası ile şekil 2a ve şekil 2b’de gözlenmektedir. 32 yıllık

meteorolojik veriler incelendiğinde bölgenin sıcaklık verisinde artış olduğu gözlenmiştir. Aynı şekilde yağış verileri incelendiğinde ise bölgenin aldığı yağışın son yıllarda azaldığı ve hatta düzensiz olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2a. Burdur istasyonunun 1986-2018 yılları arası derece biriminden sıcaklık değişimi.



Şekil 2b. Burdur istasyonunun 1986-2018 yılları arası sıcaklık yağış verilerinin milimetre biriminden gösterimi.

Ayrıca Burdur ilinin 1932-2018 yılları arasındaki ortalama yağış ve sıcaklık verileri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün internet sitesi arşivinden alınmıştır (İnt. Kayn 3 ,2020). Elde edilen verilere göre, 1932-2018 yılları arasında Burdur ilinin ortalama yıllık yağış miktarı 426,9 mm ve yıllık ortalama sıcaklık değeri 13,3°C olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan 1986-2018 yılları arasındaki veriler incelendiğinde ise yıllık ortalama yağış 416,5 mm ve yıllık ortalama sıcaklık 13,5°C'dir. Burdur ilinin ortalama sıcaklığı 0,2°C artmış ve yıllık yağış miktarı ise 10,4 mm azaldığı gözlenmiştir. Burdur gölü yapısı gereği kapalı havzadır. Gölün su kaynağı akiferlerden mevsimsel, yeraltı akışı ve yağış ile yüzey akışları ile şarj edilmesi ile olmaktadır. Göl suyunun azalması ile hava

sıcaklığının artması sonucu buharlaşmadır. Göldeki kıyı şeridi değişiminde ise meteorolojik veriler önemli rol oynamakta ve Burdur ilinin ortalama sıcaklığının artması ve yağış miktarının azalması ile ilişkili olduğu görülmektedir.

4. Uygulanan Yöntemler

Bu çalışmada, Burdur Gölü'nün 33 yıllık dönemde kıyı şeridinde meydana gelen değişimleri belirlemek ve alansal değişiklikleri hesaplamak için piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinden en çok benzerlik ve destek vektör makineleri algoritmalarına başvurulmuştur. Ayrıca piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi dışında gölü uydu görüntülerinden çıkartmak için modifiye normalize su indeksi de uydu görüntülerine uygulanmıştır. Çalışmada yer alan tüm uygulamalar için ENVI 4.8 (Exelis Vis. Inf. Sol.) yazılımı kullanılmıştır.

4.1 Spektral Su İndeksi

Uydu görüntülerinden sulu ortamların, kapalı göllerin veya akışkan nehirlerin verimli olarak ayırt edilmesi ve su bileşenlerinin tanımlanması için uzaktan algılamada su indekslerine başvurulmaktadır. Su indeksi (Normalized Difference Water Index) (NDWI), uydu görüntülerinden su bileşenlerinin tanımlanması için McFeeters (1996) ve Gao (1996) tarafından geliştirilmiştir. McFeeters (1996)'ın geliştirdiği NDWI su indeksi ile yakın kızıl ötesi (NIR) ve görünür yeşil (Green) bandı kullanarak toprak ve yerüstü bitkilerinin elimine edilmesiyle su bileşenleri belirlenir. NDWI aynı zamanda su yüzeyinin bulanıklığının belirlenmesi çalışmalarında da kullanılmaktadır. Xu (2006), McFeeters (1996) tarafından geliştirilen su indeksi modelini temel olarak Modifiye Normalize Fark Su İndisi (MNDWI) modelini geliştirmiştir.

4.1.1. Modifiye Normalize Fark Su İndeksi

Modifiye Normalize Fark Su İndeksi (MNDWI) (Xu 2006) tarafından uydu görüntülerindeki akışkan suyu daha kesin ve net olarak saptamak için bantların orantılanmasını önermiştir. MNDWI'de, yeşil bant yakın kızıl ötesi bandından daha yüksek yansıtıcılığa sahip olması sebebiyle yakın kızıl ötesi bandı yerine yeşil bant kullanılmaktadır. Landsat 5 TM uydu görüntülerinde yeşil bant 2. Bant, kısa

dalga kızıl ötesi (SWIR 1) 5. Banttır. Landsat 8 OLI uydu görüntüsünde ise yeşil bant 3. Bant ve kısa dalga kızıl ötesi ise 6. Banttır. MNDWI spektral indeksinin hem Landsat 5 TM hem de Landsat 8 OLI için kullanılan denklemleri eşitlik 1 ve eşitlik 2 olarak aşağıda sırası ile verilmiştir.

Veri setindeki uydu görüntülerine uygulanan MNDWI için eşik değerler -1 ve +1 arasında yer almaktadır. Çalışmadaki ana amaç göl yüzey alanının diğer bölgelerden ayırt edilmesi nedeni ile su alanları için eşik değer +0.6 ve üstü olarak belirlenmiş ve bütün veri setine uygulanmıştır. Şekil 3'te ise MNDWI spektral indeksinin uydu görüntülerine uygulanması sonrası yıllara göre Burdur gölündeki değişim açıkça gözlemlenebilmektedir.

$$MNDWI = (Band 2 - Band 5) / (Band 2 + Band 5) \quad (1)$$

$$MNDWI = (Band 3 - Band 6) / (Band 3 + Band 6) \quad (2)$$

Elde edilen MNDWI spektral indekslerinin görüntüleri, Coğrafi Bilgi sistemleri yardımı ile yıllara göre elle sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırma sonucu elde edilen değişimi gösteren veriler Şekil 4'te verilmiştir.

4.2 Piksel Tabanlı Sınıflandırma

Uzaktan algılama uygulamalarında, uydu görüntülerinden çalışma bölgelerine ait tematik haritaların oluşturulması sınıflandırma uygulaması ile mümkündür. Sınıflandırma, tespit edilmiş sınıf sayısına göre uydu görüntülerindeki piksellerin ilgili sınıflarla ilişkilendirilmesi ve atanması işlemidir. Piksel tabanlı sınıflandırma yöntemleri, en kısa mesafe, en çok benzerlik, paralelkenar, destek vektör makineleri olup bu çalışmada en çok benzerlik ve destek vektör makineleri algoritmaları kullanılmıştır.

4.2.1 En Çok Benzerlik ile Sınıflandırma

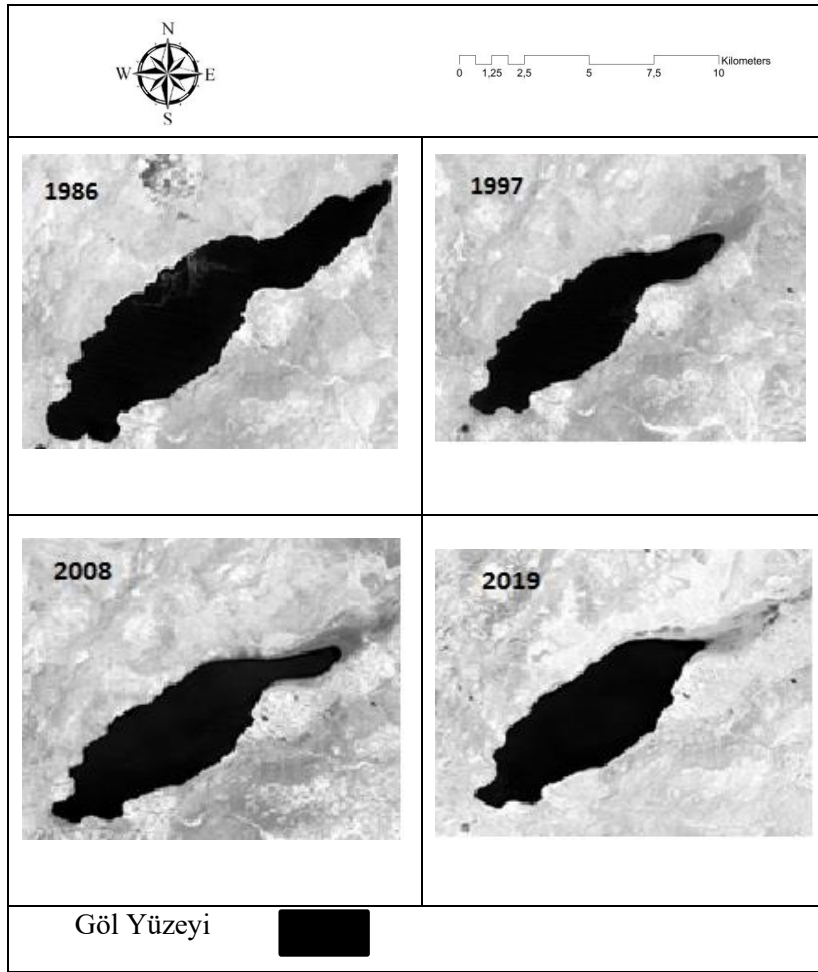
Piksel tabanlı sınıflandırma içinde literatürde en sık başvurulan ve kullanılan yöntem en çok benzerlik yöntemidir. Yöntemin ana amacı, sınıflar için eş olasılık eğrileri tanımlayarak sınıflandırılacak olan piksellerin üyeliği, en yüksek olana atanmasıdır (Sabuncu 2018). Çalışmada Burdur gölüne ait 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait uydu görüntülerine

en çok benzerlik algoritması uygulanarak sınıflandırma yapılmıştır. Bu çalışmadaki ana amaç gölün kıyı şeridinde meydana gelen değişim olması nedeni ile uydu görüntülerinde sınıflar göl ve diğerleri olarak belirlenmiştir. Şekil 5'te yıllara göre Burdur Gölünün değişimi görülmektedir.

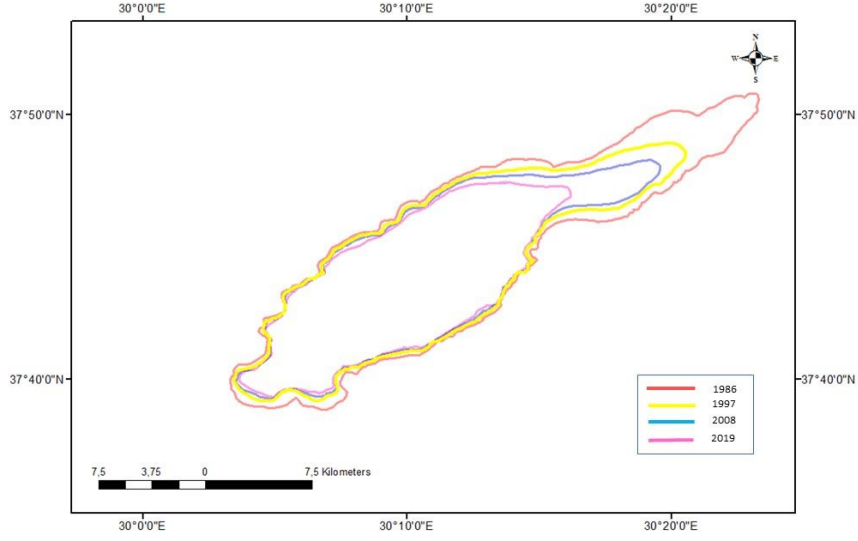
4.2.2 Destek Vektör Makineleri Sınıflandırma

Destek vektör makineleri (DVM) uzaktan algılamada kontrollü sınıflandırma yöntemleri arasında yer almaktadır ve bilim insanları tarafından son yıllarda

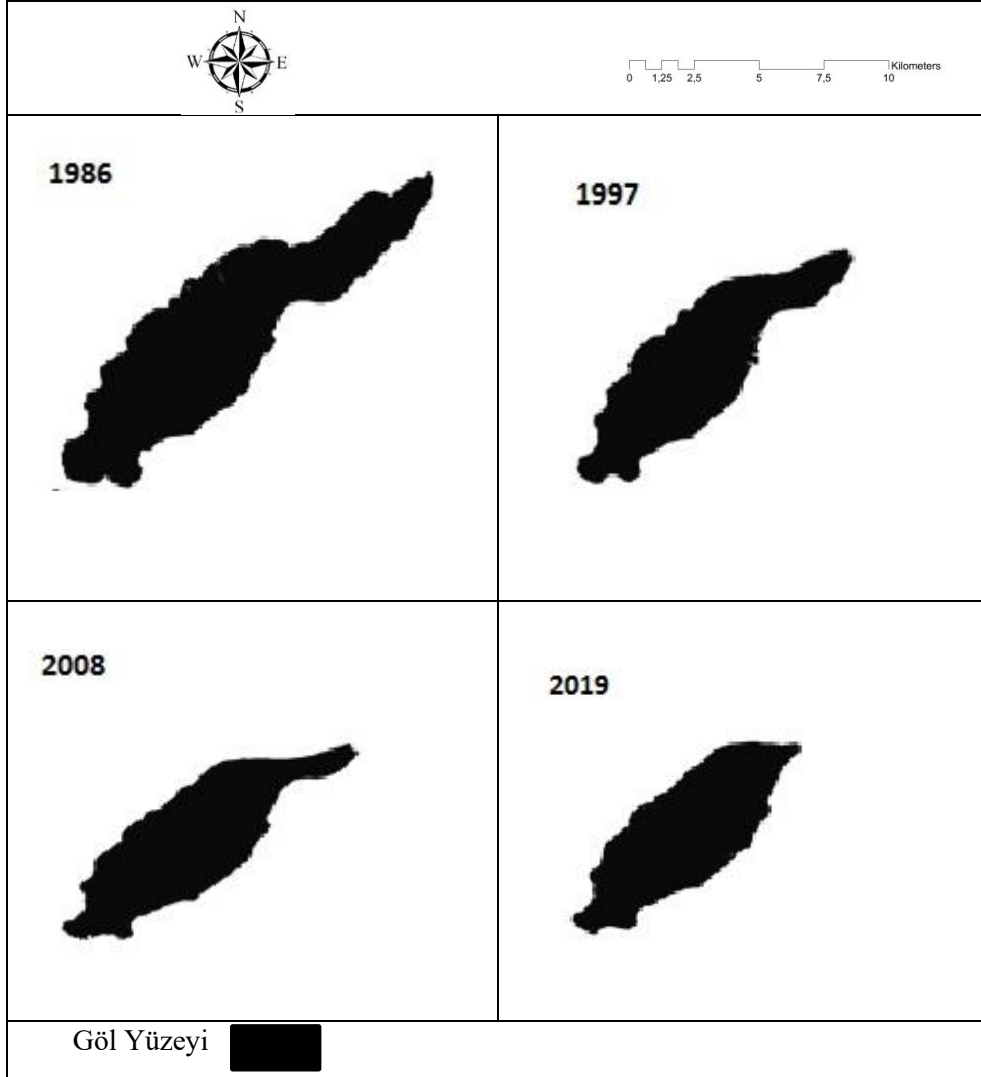
sıklıkla uygulamalarda kullanılmaktadır. DVM amacı 2 farklı sınıfa ait verileri birbirinden en iyi şekilde ayırmak için hiperdüzlem belirlemektir. Bu hiperdüzlem ile iki farklı sınıf rahatlıkla ayrılabilir. (Vapnik, 1995). Bu araştırma çalışmasında 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait elde edilmiş olan uydu görüntülerine DVM algoritması uygulanmıştır. En çok benzerlik algoritmasındaki gibi sınıflar göl ve diğerleri olarak 2 ana sınıf altında sınıflandırılmıştır. Şekil 6'da yıllara göre gölün değişimi gözlenmektedir.



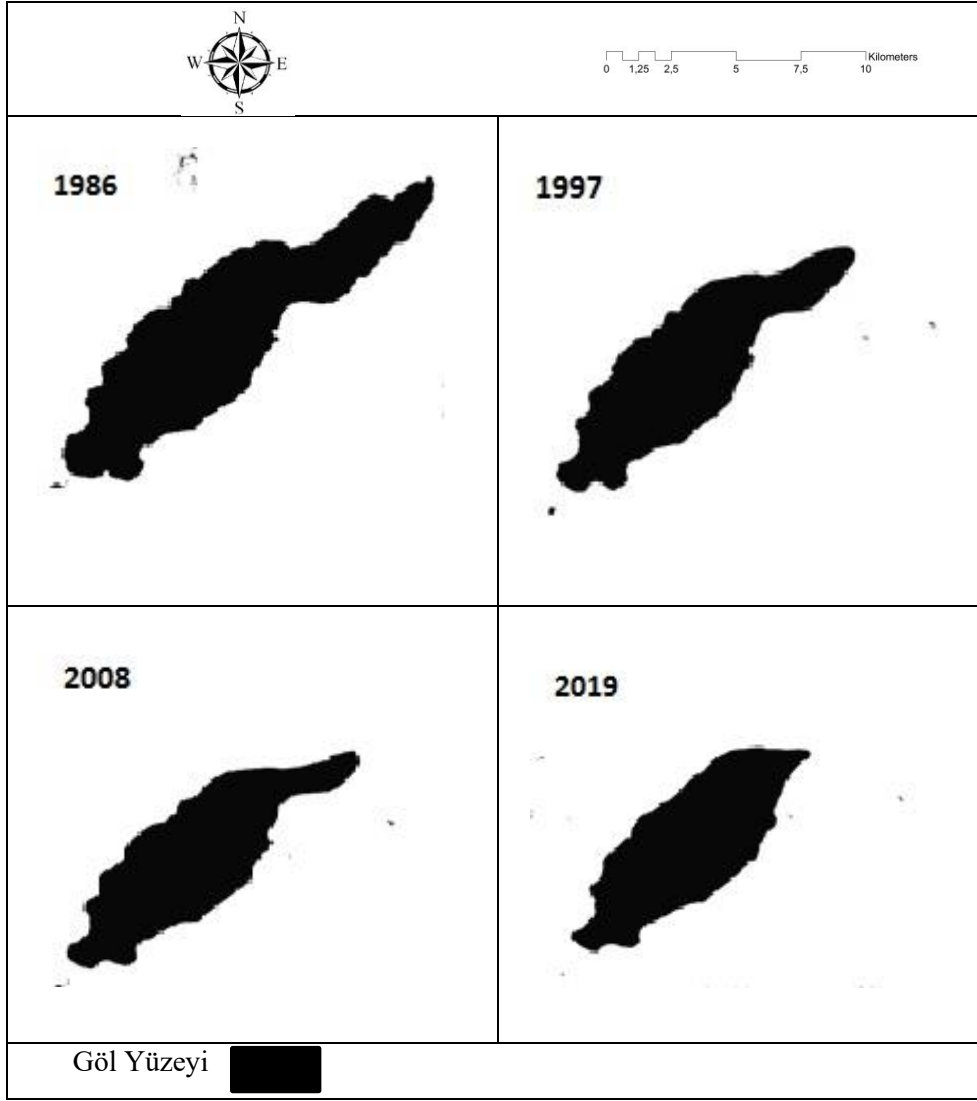
Şekil 3. Modifiye Normalize Fark Su İndeksi algoritmasının sırası ile 1986, 1997, 2008 ve 2019 yılları için Burdur Gölüne uygulanması.



Şekil 4. Modifiye Normalize Fark Su İndeksi algoritmasının 1986, 1997, 2008 ve 2019 yılları için Burdur Gölüne uygulanması.



Şekil 5. En çok benzerlik sınıflandırması sonucu 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait Burdur gölü uygulaması.



Şekil 6. Destek Vektör Makineleri sınıflandırması sonucu 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait Burdur gölü uygulaması.

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada Burdur Gölü'nün alanındaki ve kıyı şeridindeki değişimin olası nedenleri araştırılmıştır. Gölün kıyı şeridi değişimleri, çok zamanlı uydu görüntüleri ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI uydu görüntüleri kullanılmıştır. Gerekli geometrik düzeltmeler yapıldıktan sonra, gölün kapladığı alan ve kıyı şeridinin belirlenmesi için kontrollü sınıflandırma yöntemleri veri setine uygulanmıştır. Sınıflandırma uygulamasının dışında ayrıca modifiye normalize fark su indeksi de kullanılmış ve elde edilen görüntüler daha sonra CBS ortamında sayısallaştırılmıştır. Son olarak 1986-2019 yıllarında gölün kıyı şeridi değişimleri tespit edilmiştir.

Tüm uzaktan algılama ve CBS tabanlı veri işleme yöntemleri sonucu Burdur Gölü su yüzey alanında 1986 yılından 2019 yılına kadar ciddi bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Burdur gölü'nün su yüzey alanı 1986 yılında 206 km² iken 2019 yılında bu alan 125 km²'ye düşmüştür. Göl 33 yıllık dönemde toplam yüzey alanının yaklaşık % 40 lık bölümünü kaybetmiştir. 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait DVM ve En çok benzerlik yöntemi ile MNDWI yöntemine göre gölün kapladığı alanları gösteren Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sınıflandırmalar ve MNDWI sonucu 1986, 1997, 2008 ve 2019 yıllarına ait Burdur gölünün km² biriminden kapladığı alan.

Yıllar	DVM (km ²)	En Çok Benzerlik (km ²)	MNDWI (km ²)
1986	206.37	206.03	205.19
1997	165.37	164.72	164.45
2008	147.97	147.15	146.98
2019	125.80	124.91	125.05

DVM ile En Çok Benzerlik sınıflandırma sonuçları ve su indeksi sonucu elde edilen veriler ile Burdur gölünün kapladığı alandaki değişimin yıllar içinde birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Böylelikle uygulanan algoritmaların biribiri ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Sınıflandırma sonrasında işlemlerin doğruluk analizi işlemi yapılır. Doğruluk analizinin amacı, seçilen referans veriler ile sınıflandırılmış görüntü arasındaki uyumun belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda test bölgelerinde her bir sınıfa ait belirli sayıda referans pikselleri seçilmiştir. En çok benzerlik ve Destek vektör makineleri yöntemleri ile elde edilen piksel-tabanlı sınıflandırma doğruluk analizi klasik hata matrisi ile irdelenmiştir. Doğruluk analizinde, her bir sınıf doğruluğunun ortalama değeri olan “Genel Doğruluk (GD; yüzde olarak)” ile sınıflandırma doğruluğunu ağırlıklı olarak hesaplayan bir istatistiksel ölçüt olan “Kappa Katsayısı (KK)” kullanılmıştır (Sabuncu ve Özener, 2019). En çok benzerlik yöntemi ve DVM yöntemi içinde elde edilmiş olan doğruluklar çizelge 3’te verilmiştir. Gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilmiş görüntülerin sınıflandırma doğruluklarının analizleri için 200 adet kontrol noktası kullanılmıştır. Sınıflandırmalar sonucu elde edilen doğrulukların %90’nın üzerinde olduğu ve sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu görülmektedir.

Çizelge3.Sınıflandırmalar sonucu elde edilen sınıflandırılmış görüntülerin doğruluk analizleri.

Yıl	DVM	En çok benzerlik
	GD /KK	GD /KK
1986	% 99.38 / 0.98	% 90.14 / 0.74
1997	% 99.56 / 0.99	% 95.46 / 0.90
2008	% 99.56 / 0.98	% 97.24 / 0.87
2019	% 98.61 / 0.96	% 96.77 / 0.93

Çalışmada MNDWI ile su tespiti uzaktan algılamanın sıklıkla başvurduğu bir algoritmadır. MNDWI dışında ayrıca sınıflandırma teknikleri de literatürde araştırmacıların sıklıkla kullandıkları teknikler arasında yer almaktadır. Bu çalışmadaki amaç; hem MNDWI yöntemi hem de sınıflandırma yöntemleri ile su alanlarının diğer alanlardan rahatlıkla tespit edilmesi, alanlarının hesaplanması ve farklı yöntemlerin sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bu sebeple sadece MNDWI yöntemi değil aynı zamanda uzaktan algılamanın sıklıkla başvurduğu sınıflandırma tekniklerine de çalışmada yer verilmiştir. Ayrıca MNDWI yöntemi ve DVM , En çok benzerlik sınıflandırma yöntemleri ile Burdur gölünün su yüzey alanı km² biriminden rahatlıkla hesaplanmış ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu sebeple de 3 farklı çalışmanın sonuçlarının birbiri ile tutarlı olduğu gözlenmiştir.

Burdur gölündeki su seviyesinin yıllar içinde ciddi olarak azalmasının nedenleri meteorolojik ve antropolojiktir. İklimlerin değişmesi, küresel ısınmanın son yıllarda insanı olguna gösterdiği bir çok farklı doğa olayının yanı sıra uzun vadede de göllerin kuraklaması yer almaktadır. Bu sebeple, karar vericilerin Burdur gölünü koruması ve çevresinde yer altı sularının çekilmesine izin verilmemesi, gereksiz su kullanımının önlenmesi ve plansız yapılaşmaya izin verilmemesi önerilmektedir.

Uzaktan algılama algoritmaları, klasik ve geleneksel yöntemlere nazaran daha hızlı, ekonomik ve güvenilir olmaktadır. Bu sebeple bir çok bilimsel araştırmada kıyı şeridinde yıllar içinde meydana

gelen konumsal değişiklikleri tespit etmek için uydu görüntülerine ve uzaktan algılama algoritmalarına başvurulmaktadır.

Teşekkür

Yazar, Landsat verilerini ücretsiz olarak sağladıkları için Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Merkezine (USGS) veri destekleri için teşekkür eder. Ayrıca Burdur istasyonunun meteorolojik verilerini sağlayan Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Meteoroloji Laboratuvarı'na teşekkür eder.

6. Kaynaklar

Aladin, N., Crétaux, J. F., Plotnikov, I. S., Kouraev, A. V., Smurov, A. O., Cazenave, A., Papa, F. 2005. Modern hydro-biological state of the Small Aral sea. *Environmetrics*, **16** (4), 375–392. <https://doi.org/10.1002/env.709>

Almeida, L. P. Masselink, G., Russell, P. E. ve Davidson M. A. 2015. Observations of gravel beach dynamics during high energy wave conditions using a laser scanner. *Geomorphology*, **228**, 15–27.

Andrioloa, U., Almeidab, L. P. ve Almard R. 2018. Coupling terrestrial LiDAR and video imagery to perform 3D intertidal beach topography. *Coastal Engineering*, **140**, 232-239.

Aouiche, I., Daoudi, L., Anthony, E.J., Sedrati, M., Ziane, E., Harti, A., Dussouillez, P., 2016. Anthropogenic effects on shoreface and shoreline changes: input from a multi-method analysis, Agadir Bay, Morocco. *Geomorphology* **254**, 16–31.

Aykut, N.O., 2019. İnsansız Hava Araçlarının Kıyı Çizgisinin Belirlenmesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Geomatik Dergisi*, **4**, 2, 141-146.

Babich, D.B., Vinogradov, N.N., Ivanov, V.V., Korotaev, V.N., Chalova, E.R. 2015. Deltas of the rivers running in to lakes and reservoirs: Morphogenetic types and recent dynamics. *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Seriya Geografiya*, **4**, 18-26. (In Russian with English summary).

Bayram B., Demir N., Ogurlu M., Catal R. H., Seker D. Z. 2016. 3D Shoreline Extraction Using Orthophoto-Maps

and LIDAR. In: 37 th Asian Conference on Remote Sensing, Sri Lanka, Colombo, pp.1-5.

Bayram B., Avşar E. Ö., Şeker D. Z., Kayı A., Erdoğan M., Eker O., Janpaule I., Çatal R. H. (2017). The Role Of National And International Geospatial Data Sources In Coastal Zone Management. *Fresenius Environmental Bulletin*, **26** (1), pp. 383- 391

Davraz, A., Şener, E., Sener, S., 2019. Evaluation of climate and human effects on the hydrology and water quality of Burdur Lake, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, **158**, doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.103569.

Du, Y., Cai, S., Zhang, X., Zhao, Y., 2001. Interpretation of the environmental change of Dongting Lake, middle reach of Yangtze River, China, by Pb-210 measurement and satellite image analysis. *Geomorphology*, **41**: 171-181

Duru, U., 2017. Shoreline change assessment using multi-temporal satellite images: a case study of Lake Sapanca, NW Turkey. *Environmental Monitoring Assessment*, **185**.

French, P.W., 2001. Coastal Defences: Processes, Problems and Solutions. Taylor and Francis, London, 1-384.

Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, **58**: 257-266.

Güney, Y. ve Polat, S. 2015. Uzaktan Algılama Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi: Aliğa ve Çandarlı Örneği. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, **8**, 11-17.

Ingham, A.E. 1992. Hydrography for surveyors engineers. Blackwell Scientific Publications, 1-132.

Jahncke, R., Leblon, B., Bush, P. ve LaRocque, A. 2018. Mapping wetlands in Nova Scotia with multi-beam

- RADARSAT-2 Polarimetric SAR, optical satellite imagery, and Lidar data. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, **68**, 139–156.
- Kalkan, K., Bayram, B., Maktav, D., & Sunar, F. 2013. Comparison of support vector machine and object based classification methods for coastline detection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W2, ISPRS2013-SSG, Antalya, Turkey.
- Kiage, L.M., Liu, K.B., Walker, N.D., Lam, N., Huh, O.K., 2007. Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: evidence from Landsat TM and ETM+. *International Journal of Remote Sensing* **28** (19): 4285-4309
- Legesse, D., Ayenew, T., 2006. Effect of improper water and land resource utilization on the central main Ethiopian rift lakes. *Quat International*, **148**: 8-18.
- McFeeters S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. **17**(7):1425-1432.
- Ormeçi, C., and Ekercin, S. 2007. An assessment of water reserve change in the Salt Lake, Turkey through multitemporal Landsat imagery and real-time ground surveys. *Hydrological Processes*. doi: 10.1002/hyp.6355
- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A., Palomar-Vázquez, J., 2012. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing Environment*. **123**, 1–11.
- Penny, D., Kealhofer, L., 2005. Microfossil evidence of land-use intensification in north Thailand. *Journal of Archaeological Science* **32**: 69-82
- Sabuncu, A., 2018. Yüksek Mekansal Çözünürlüklü Uydu/Uçak Platformlu Görüntüler ve CBS Teknolojisi Kullanılarak Van-Erciş Depremi Sonrası Bina Hasar Tespiti. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 130.
- Sarp, G., and Ozcelik, M. 2016. Water body extraction and change detection using time series: a case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University of Science*.doi: 10.1016/j.jtusci.2016.04.00
- Saroğlu, E., Kaya, Ş. ve Örmeci, C. 2005. Farklı Çözünürlükteki Uydu Görüntülerinin Geometrik Dönüşüm. HKMO, 2019.
- Tagil, S. 2007. Quantifying the change detection of the Uluabat wetland, Turkey, by use of Landsat Images. *Ekoloji*, **16** (64),9–20.
- Temiz, F., and Durduran, S. 2016. Monitoring coastline change using remote sensing and GIS technology: a case study of Acıgöl Lake, Turkey. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*.doi:10.1088/1755-1315/44/1/011001.
- Timoshkin, O. A., Samsonov, D. P., Yamamuro, M., Moore, M. V., Belykh, O. I., Malnik, V. V., M.V.Sakirkoo,A.A.Shirokayaa,N.A.Bondarenkoa,V.M.Domyshevaa,G.A.Fedorovaa,A.I.Kochetkovb,A.V.Kuzmina,A.G.Lukhneva,O.V.Medvezhonkovaa,A.V.Nepokrytykha,E.M.Pasynkovab,A.E.Poberezhnayaa,N.V.Potapskayaa,N.A.Rozhkovaa,N.G.Shevelevaa,I.V.Tikhonovaa,E.M.Timoshkinaa,I.V.Tomberga,E.A.Volkovaa,E.P.Zaitsevaa,Yu.M.Zverevaa,A.B.Kupchinskya,N.A.Bukshuka, 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research*, **42** (3), 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>
- Vapnik, V. N., 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag, New York, 1-314.
- Yan, P., Shi, P., Gao, S., Chen, L., Zhang, X., Bai, L., 2002. ¹³⁷Cs dating of lacustrine sediments and human impacts on Dalian Lake, Qinghai Province, China. *Catena*, **47**: 91-99.
- Yıldırım, Ü., and Uysal, M., 2011. Changes in the Coastline of the Burdur Lake between 1975 and 2010. *Proceedings of the International Symposium on Environmental Protection and Planning: Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Applications (ISEPP)*, 7-12. DOI: 10.5053/isepp.2011.1-5.
- Yoo, C.I. and Oh, T. S. 2016. Beach volume change using UAV photogrammetry Songjung beach, Korea, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch., vol. 41, no. July, pp. 1201– 1205.

Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal Remote Sensing* **27**, 3025–3033.

İnternet kaynakları

- 1- <https://www.ramsar.org/wetland/turkey>, (07.02.2020)
- 2- <https://earthexplorer.usgs.gov/>, (15.12.2019)
- 3- <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=BURDUR> (20/07/2020)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045504 (634-650)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045504 (634-650)

DOI: 10.35414/ akufemubid.679980

Araştırma Makalesi / Research Article

GIS-Based Land Suitability Analysis for Sustainable Urban Development: A Case Study in Eskişehir, Turkey

Sayed Ishaq DELIRY ^{1*}, Hakan UYGUÇGİL ²¹ Eskişehir Technical University, Graduate School of Sciences, Department of Remote Sensing and Geographical Information Systems, Eskişehir, Turkey² Eskişehir Technical University, Earth & Space Sciences Institute, Department of Geodesy and Geographic Information Sciences, Eskişehir, Turkey

*Corresponding author e-mail: deliry.ishaq@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5467-1403>
uygucgil@eskisehir.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3100-0129>

Geliş Tarihi: 27.01.2020

Kabul Tarihi: 28.08.2020

Abstract

Suitable site selection for sustainable urban development is one of the critical and complex issues in urban planning. Since in the selection of land for urban development, many criteria must be considered and analyzed, it is required to use the most effective techniques to identify the best location for urban expansion. In order to consider the environmental sustainability in site suitability analysis, using Geographic Information System (GIS) can help for successful analysis and decision making. This study aims to find the most suitable location for sustainable urban development in Eskişehir province based on six main planning criteria, including ten sub-criteria. Safety, connectivity, socio-economic, compactness, topography, and eco-environmental conservation were considered as the main planning goals. Geophysical, cultural, and socio-economic data were used to assess land suitability for future urban growth by integrating the Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS. The findings of this research based on multi-criteria decision analysis revealed that the most extensive area has low suitability (44%) for sustainable development, while unsuitable areas represent 42% of the total area of the city. Areas with the highest suitability were rarely found (0.01%). Very low suitable lands were found as 7% of the total area. Moderately suitable regions constitute 7% of the entire area, which is composed of well-connected regions and can be used as second-degree suitable land for future sustainable urban development in the study area. The study presents an insight into sustainable urban development using GIS techniques and highlights the significant constraints that the city is facing.

Keywords

GIS-based multi-criteria evaluation;
Land suitability analysis;
Land-use planning;
Sustainable urban development;
AHP;
MLC

Sürdürülebilir Kentsel Gelişme için CBS Tabanlı Arazi Uygunluk Analizi: Eskişehir Örneği

Öz

Kentsel gelişim için uygun alanların seçimi kentsel planlamada kritik ve karmaşık konulardan biridir. Kentsel büyüme için yer seçiminde pek çok kriter göz önünde bulundurulmalı, karşılaştırılmalı ve uygun yöntemler kullanılmalıdır. Çevresel sürdürülebilirliği sağlayabilmek adına kentsel gelişim için yer seçimi analizinde, coğrafi bilgi teknolojilerinin kullanılması, doğru analiz ve doğru karar vermede yardımcı olabilecek güçlü yöntemlerden biridir. Çalışmanın amacı, Eskişehir il genelinde 6 ana planlama kriterine bağlı, toplamda 10 alt kriterle dayanarak sürdürülebilir kentsel gelişim için uygun yer bulmaktır. Çalışmada kullanılan 6 ana planlama kriteri doğrultusunda, güvenli (risk ve afet), kolay ulaşılır (ulaşım), bütünsel (mevcut kentsel alanlara bitişik), sosyo-ekonomik açıdan eşit (eğitim ve sağlık hizmetleri açısından eşitlik), ekolojik (çevreye duyarlı) ve kentsel gelişime uygun az eğimli yerler seçilmeye çalışılmıştır. Eskişehir il genelinde kentsel büyümeye uygun yerleri belirlemek amacıyla fiziki, kültürel, sosyal ve ekonomik veriler kullanılmıştır. Çalışmada belirlenen kriterlere göre il sınırları içerisinde kalan alanın % 44'ü kentsel büyüme için düşük uygunluğa sahip iken, % 42'si uygun olmayan alan olarak hesaplanmıştır. Kentsel gelişime en uygun yerler ise % 0,01 oranında bulunmuştur. Ayrıca il sınırları

Anahtar Kelimeler

CBS tabanlı çok kriterli değerlendirme;
Arazi uygunluk analizi;
Arazi kullanım planlaması;
Sürdürülebilir kentsel gelişme;
AHP;
MLC

çerisinde kalan toplam alanın % 7'si kentsel büyüme için çok düşük uygunluğa sahipken, %7'si de orta derecede uygun alan olarak bulunmuştur. Diğer bir deyişle, %7 oranında orta derecede uygunluk derecesine sahip alanlar, gelecekte kentsel büyüme için ikinci derece uygun alanlar olarak kullanılabilir. Çalışma, CBS tekniklerini kullanarak sürdürülebilir kentsel kalkınma hakkında bir fikir vermekte ve kentin karşı karşıya olduğu önemli kısıtlamaları vurgulamaktadır.

1. Introduction

Today, more than half of the world's population resides in urban areas, and this is due to socio-economic reasons which lead people to move from rural areas to urban areas (Desa 2014). Therefore, the trend towards urbanization is increasing, which results in the growth of the urban population and the extent of urban areas (Desa 2014). In recent decades, due to concerns over clean air and water, climate change, and land-use, sustainability has attracted attention, especially sustainable urban planning (Wheeler and Beatley 2014). Since changes in urban population result land-use change, effective land-use planning is needed to evaluate the best land areas for urban growth. According to the FAO definition, the term "land-use" is related to human activities on land, such as agriculture, buildings, roads, etc. While the term "land cover" describes both the natural and the artificial features present on the surface of the earth. Land-use planning is defined by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (UNFAO) as "the systematic assessment of land and water potential, alternatives for land-use and economic and social conditions in order to select and adopt the best land-use options" (FAO 1993, p. 1). In the land-use planning process, the ecological, environmental, and socio-economic aspects, including the sustainability of land-use, are needed to be taken into consideration (FAO 1993, 2007). Protection of the environment and cultural heritage plays an important role in urban planning. Preservation of cultural heritage assets means maintaining the history of a nation (Doğan and Yakar 2018). Thus, evaluation of land suitability and effective land-use planning is vital for sustainable urban development (Nguyen et al. 2015, Scholten and Stillwell 2013).

Planning includes a variety of activities and exists in many variations undertaken at different spatial scales that differ with respect to many distinctions (Scholten and Stillwell 2013, Van Assche et al. 2013). Spatial planning is a coordinated set of policies, practices, and scientific discipline, which is concerned in shaping and governing spaces considering socio-economic and eco-environmental issues (Van Assche et al. 2013).

Information has an important role in planning, and it is vital in achieving the objectives of planning (Scholten and Stillwell 2013). Scholten and Stillwell (2013) define planning as information processing activity; therefore, all of the information which is used in the planning process must be organized, managed, and presented in an appropriate form. Since large amounts of spatial data with their attributes are involved in multi-criteria environmental planning, which can be in different types and extensive in quantity and quality, thus only a system like Geographic Information System (GIS) can provide the framework to undertake these activities. Accordingly, numerous spatial decision-making issues lead to the GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA); therefore, the integration of these two areas of research gives best results in suitability modeling (Malczewski 2006). In modern urban planning, remotely sensed datasets are the fundamental information, providing accurate and reliable information for planning and management that can be further integrated with many other spatial attributes. The integration of Remote Sensing (RS) and GIS enabled with multi-criteria evaluation methods, facilitates a better understanding of real planning problems and provides extremely useful decision support to the analyst (Akanbi et al. 2013, Chen 2016, Scholten and Stillwell 2013, Taranto 2007, Yeh 1999). Considering the increasing scientific

applications of GIS, it has been recently referred to geographic information science or GIScience. Blaschke et al. (2014) define GIScience as a multidisciplinary and multi-paradigmatic rapidly developing field with fuzzy boundaries, which cannot be demarcated to a particular field.

Sustainable urban planning requires the involvement of various disciplines, including architecture, engineering, ecology, environmental science, economic development, law, and politics, among others. Hence experts' opinion from various fields is strongly required in the planning process (Aburas et al. 2017, Chen 2016).

According to the year 2017, the population growth rate of Eskisehir city is 1.85 %. Therefore, it is required to pre-determine the new location for future sustainable urban development in this city. This study aims to integrate the GIS-based Weighted Linear Combination (WLC) technique with the Analytical Hierarchy Process (AHP) to analyze and find the most suitable areas for sustainable urban development in Eskisehir city. The study shows the significance of GIS and remote sensing application in spatial decision making in a case study of sustainable city development.

2. Methodology

Site selection for sustainable urban development was the purpose of this research. To achieve the aim of the study, the following processes were performed. First, the study area and planning criteria were defined. The main urban planning goals were defined as follows (Chen 2016): safe city, ecological city, connected and compact city, and city of equality. Then the required data were collected and pre-processed accordingly. Subsequently, GIS-based multi-criteria decision analysis was performed. Finally, by conduction spatial data analysis, the suitability map was created, and the results were presented.

2.1. Study area

Eskisehir province was selected as the study area. Eskisehir is located in the north-western of Central Anatolia Region of Turkey between latitudes 39-40°N and longitudes 29-30°E. The city is 78 km to the northeast of Kutahya, 233 km to the west of Ankara, and 324 km to the southeast of Istanbul. It is located on the banks of the Porsuk river with an elevation of 782 m. The province has 14 districts and covers an area of 2,678 km². Based on 2017 statistics, the urban population of the city is 784,036, with a metropolitan population of 860,620 and an annual growth rate of 1.85% (HTTP. 1). Eskisehir is one of the leading cities with a modern, regular, and high rate of urbanization. The city is known as a university town. In terms of socio-economic development, it is one of the most important cities in Turkey. The economy of the city is based on services (60%), industry (30%), and agriculture (10%) (HTTP. 2). Eskisehir has a humid continental climate with a warm summer and cold and snowy winter. The average minimum and maximum temperature reach -3.5 °C and 29.1 °C, respectively. The average amount of annual precipitation is about 400 mm. The urban settlement and commercial areas are mostly flat.

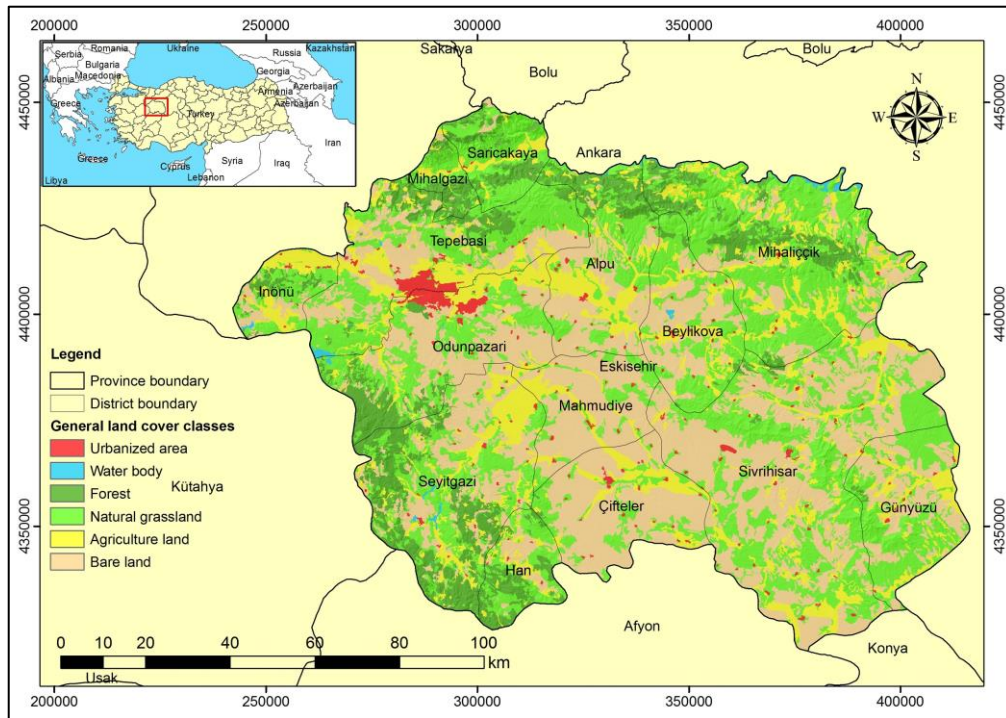


Figure 1. Study area

2.2. Materials

To achieve the study goals, the criteria table was prepared, and related socio-economic and physical environment data were collected from different sources such as remotely sensed satellite data and thematic maps. Preprocessing such as

mosaicking, coordinate transformation (projection), resampling, and subsetting was performed on each raster and vector data to prepare the data for analysis. Table 1 shows the collected data used in spatial analysis.

Table 1. Data used in spatial analysis.

Data	Data type	Data source
Digital Elevation Model (spatial resolution, 30 m)	Raster	United States Geological Survey (USGS)
Land cover (resolution, 100m)	Raster	European Environment Agency, CORINE 2012
Geological data	Vector	Hydrogeological Map of Eskişehir and İnönü Plains (DSI). Eskişehir Geological Map made by MTA.
Fault lines	Vector	Hydrogeological Map of Eskişehir and İnönü Plains (DSI). Eskişehir Geological Map made by MTA.
Protected areas	Vector	Eskişehir Regional Directorate of Forestry, Department of Water Affairs. Data collection and preparation: (Ağaçsapan and Çabuk 2016)
Hydrological data (Streams)	Vector	European Environment Agency
Roads	Vector	OpenStreetMap
Built-up	Raster	European Environment Agency
Educational centers	Vector	Google Maps
Health centers	Vector	Google Maps

2.3. Methods

The flowchart of the overall methodology adopted in this study is shown in Figure 2. For the purpose of land suitability analysis for sustainable urban development, GIS techniques and Analytical Hierarchy Process (AHP), introduced by Saaty (1987) were used. AHP is one of the useful multi-criteria decision analysis methods, which is widely used in GIS-based decision analysis (Aburas et al. 2017, Bozdağ et al. 2016, Saaty 2008)

Along with the AHP, weighted overlay analysis was performed in the ArcGIS environment. Weighted overlay analysis is a group of methodologies and one of the most commonly used approaches for solving multi-criteria problems, especially in optimal site selection or suitability modeling. The analysis was performed according to the following steps: firstly, the problem was divided into sub-models, then the significant layers were determined, and geoprocessing operations were performed on each input layer.

Then, the layers were reclassified and standardized to make the data comparable and combinable with each other. In this stage, the common scale of 1 to 5 was selected, in which higher values indicate more suitable locations for urban growth.

Subsequently, using the AHP method, factor weights were determined by pairwise comparison matrix. The criteria influence weights were defined based on the literature review (Akbulut et al. 2018, Aburas et al. 2017, Aburas et al. 2015, Chen 2016, Kumar and Shaikh 2013) and experts' opinion.

After transforming the data within a layer and determining criteria weights, the input thematic maps were superimposed using the weighted overlay method. Finally, after computations and analysis, suitable and unsuitable areas were identified in the final suitability map. A Detailed description of the methodology is presented in the following sections.

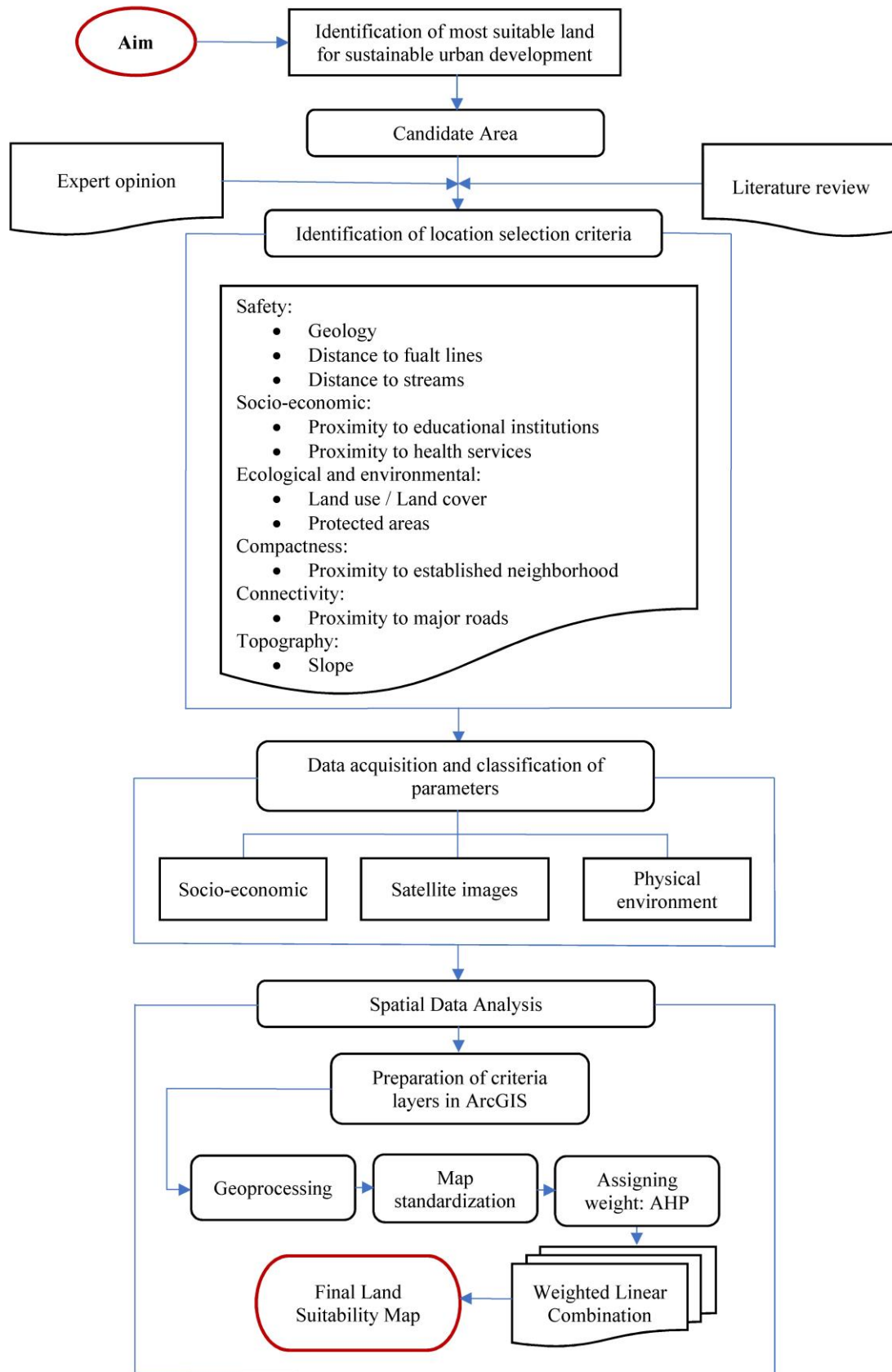


Figure 2. Overall flowchart of the research methodology

2.3.1. Defining and creating planning criteria layers

In order to identify the most suitable areas for future urban development, socio-economic and environmental factors must be considered to ensure sustainability (Aburas et al. 2017, Chen 2016)). Eskisehir has experienced a remarkable development in recent years; education, health, professional services, and commerce represent a notable contribution to the community. This development has become an essential source of employment. Education, health, and transport infrastructure are the anchors of growth. The presence of major roads and infrastructure contributes to the connectivity between neighboring cities providing opportunities for growth in Eskisehir. By completing and improving what has already been built, the benefits of past investment will increase. Furthermore, it will settle people in proximity to one another and lead to job creation. Additionally, geographical characteristics and natural resources provide extra value to the city.

In this study, ten criteria were selected for evaluating land suitability. The six main planning criteria considered as the primary planning objectives of the study are:

1) Safety: The new development area must be safe from natural hazards and disasters; therefore, areas with a certain vulnerability should be avoided in future development. Thus, to avoid geohazards, the following three factors were defined as sub-criteria for the safety factor of the land suitability analysis:

Geological stability: Any engineering structure requires detailed knowledge of engineering geological properties of the foundation as well as the material used for construction (Tudes 2012, Culshaw and Price 2011). To prevent related hazards, the new urban area should be placed on the most stable geological formation. Eskisehir city is characterized by widely distributed alluvium soil deposited by different processes, conglomerate, siltstone, claystone, limestone, shale, marl, and other hard rocks (basalt, granite, andesite, etc.). For this purpose, the geological map was reclassified into five categories, and

scores were given based on the material type (Figure 3a). The lowest grade was given to areas covered by loose and unstable materials (e.g., alluvial) because these materials are very susceptible to volume changes due to variations in moisture content, which can cause cracking and stability problems in structures built upon such materials (Tudes 2012, Culshaw and Price 2011).

Distance from fault lines: The urban area must be selected at a safe distance from geological fault lines. Eskisehir fault system is generally NW and EW trending zone of active deformation, which predominantly characterized as strike-slip faults (Tudes 2012, Culshaw and Price 2011). The farther a structure to the existing fault line or seismic generator, the lower its magnitude and intensity. To mitigate the risk of earthquake, buffer zones were created using fault lines in the vector map; areas with less than 250 m distance from fault lines were defined as unsafe, and for greater than that, higher scores were gradually given, which the highest grade assigned to distances >1500 m (Figure 3b).

Distance from flood zones: The future development area should be located at a safe distance from flood zones. To avoid flood hazards, buffer zones were created using stream map, and after converting from vector to raster, the map was reclassified and rated based on buffer distances. Areas <500 m away from streams were considered vulnerable and unsuitable, and areas with a distance of 500-750 m were ranked with very low suitability. The ranking score was increased with the increase of distances, where the highest score was given to the areas >1250 m away from flood zones (Figure 3c).

2) Slope: The urban area should be located on relatively flat land because areas with steep and high slope are prone to landslides (Tudes 2012, Culshaw and Price 2011, Akbulut 2018). Due to issues such as flooding, erosion, as well as the cost of construction, steep slopes should be avoided. To analyze the topography of the city, we need the elevation model. For this purpose, eight scenes of the SRTM digital elevation model (DEM) with 30 m resolution were gathered and mosaicked. Subsequently, the slope map was

generated in percent increments using the DEM data and reclassified (Figure 3d). After reclassifying the slope map, scores were given based on the slope percentage. Areas with a slope of <5% were considered as potentially suitable, and the suitability was reduced with the increase of slope, where sites with a slope >25% were ranked as unsuitable.

3) Ecology and environment: Since sustainable development is our main objective, conservation of ecosystems and natural resources is of paramount importance. The future urban area should not affect the environment, especially ecologically sensitive areas; flora and fauna must be considered in the establishment of the new urban areas. To develop the city with less damage and negative effects on nature and the environment, forests, green areas, agriculture, and restricted areas should be preserved and protected (Chen 2016, Bozdağ et al. 2016). Today, using science and technology and forward-looking approaches, decision making is quite easy to create a resilient, livable, ecological, and sustainable city. To achieve this goal, the land cover map of the study area was reclassified and ranked as per their suitability (Figure 3e).

The map of protected areas was used as a sub-criterion of the ecological and environmental factor. The land cover and protected area maps were reclassified, in which classes such as natural resources and protected areas were restricted. Buffer zones were created around protected areas (archaeological sites, lakes, natural sites, etc.), and areas with distances greater than 500 m were ranked as suitable sites. (Figure 3f). Keeping sustainability in mind, instead of using soil map as another criterion, agriculture and green areas were given lower scores, and higher scores were assigned to barren and other available areas in the land cover map.

4) Compact city: To take advantage of existing sources, such as infrastructure and facilities, and to reduce the costs of housing development, the future urban area should be in reasonable proximity to the existing built-up areas to consolidate the urban zone and reduce the impacts of urban sprawl (Chen 2016). To achieve

this goal, and have a more compact urban form, buffer zones were created around established urban areas on the residential map, and the map was rated based on proximity to buffer zones, where the highest score was assigned to the nearest sites (Figure 3g).

5) Socio-economic (city of equality): Undoubtedly, education and health are the basic requirements of each person; thus, areas for future growth should be reasonably close to existing educational institutions and health services (Chen 2016). This goal is of great importance for urban development. To this end, maps of schools and health services were prepared, and buffer zones were created. Areas with the closest distance were considered highly suitable (Figures 3h & 3i).

6) Connectivity (transport): Eskisehir city is served by well-developed urban transport and roads. Access to existing infrastructure prevents extra costs and provides an opportunity for urban growth and densification. To retain the sustainable connectivity between existing and future built-up areas in the city, the map of major roads was prepared, and buffer zones were created. Regions closest to the main roads (<500 m) were considered to be highly suitable, and the ratings were gradually reduced depending on the distance to the buffers, where areas with distances >2 km were rated with lower suitability scores (Figure 3j).

2.3.2. Determining criteria weights using analytical hierarchy process (AHP)

The AHP method was used to evaluate each criterion and determine the weights of the main and sub-factors. Since multiple important objectives are difficult to prioritize, AHP can serve as a powerful MCDA tool to consider complicated problems that involve several interrelated objectives (Saaty 1987, 2008, Ouma and Tateishi 2014). AHP has the ability to allow a hierarchical structure of the criteria, when allocating the weights, it gives users a better focus on specific criteria and sub-criteria. This provides the active participation of decision-makers in examining all possible options.

The AHP process consists of four principal steps (Saaty 1987, Saaty 2008). The first step is to breakdown the problem into a hierarchical structure. For this purpose, the abovementioned criteria were created and divided into sub-criteria. The second step is to create decision matrices at each level. A pairwise comparison matrix was developed, where each factor was compared with the other factors relative to its importance based on a scale of 1 to 9, where 1 indicates equal

preference between two factors, and 9 shows a particular factor which is extremely preferred over the other (1= equal, 3= slightly favors, 5= strongly favors, 7= very strongly favors, 9= extremely favors; 2, 4, 6 & 8 are intermediate values). This pair comparison makes it possible to independently assess the contribution of each factor, thus simplifying the decision-making process.

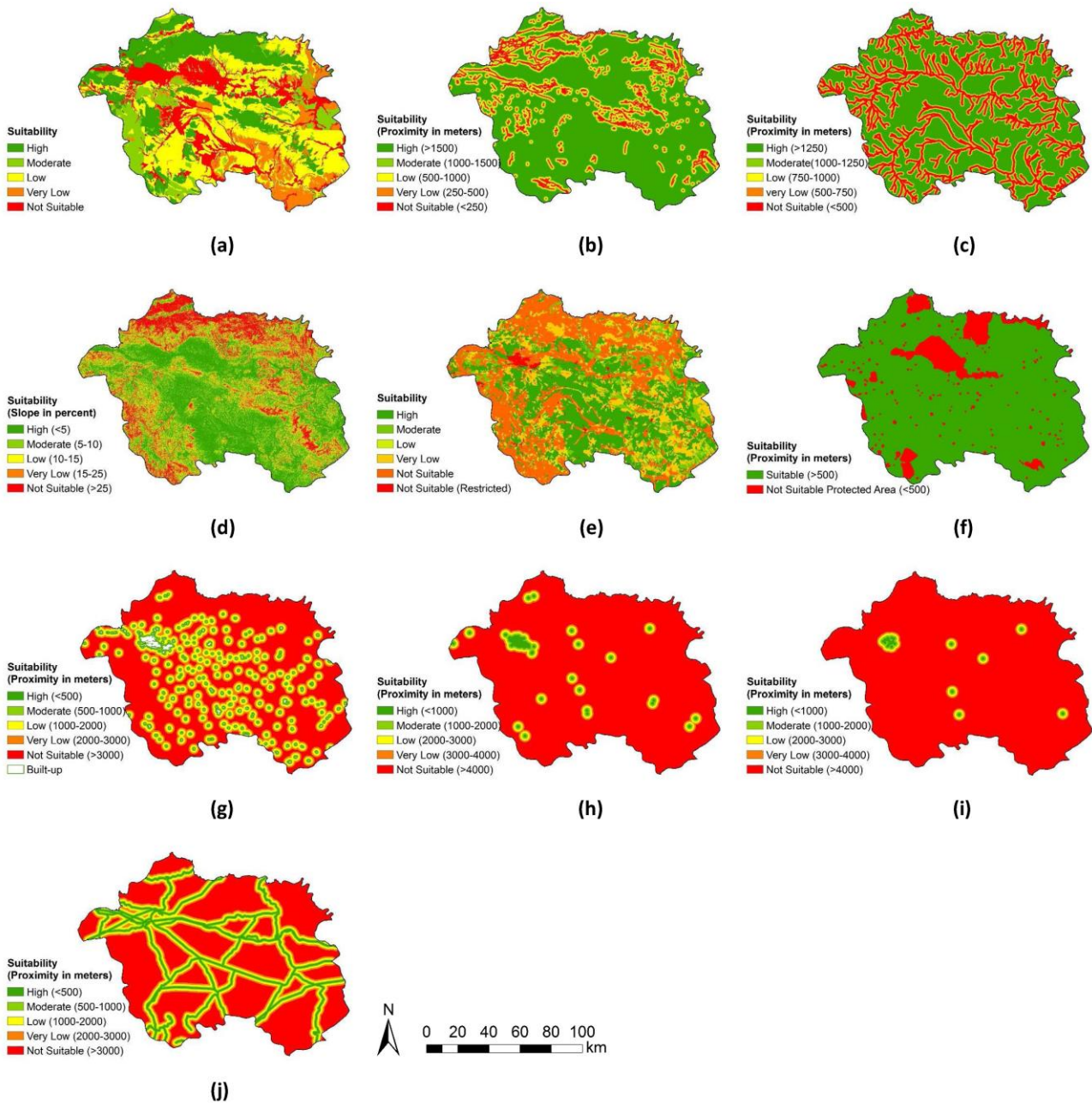


Figure 3. Geo-processed and reclassified thematic layers used in GIS-based multi-criteria land suitability analysis: (a) geological map; (b) distance to fault lines; (c) distance to streams; (d) slope; (e) land cover; (f) protected areas; (g) distance to existing built-up areas (compact city); (h) distance to educational institutions; (i) distance to health services; and (j) distance to major roads.

In the third step, after the development of the ratio matrix, each main and sub-factor in the matrix was normalized by dividing each factor value in every column by the sum of that column. Then, the relative weights (which is also called normalized principal Eigenvector) were calculated for each factor by determining the mean value of the rows using the pairwise comparison method (Table 3). In order to verify the consistency of the calculated weights, the consistency ratio (CR) should be calculated, and it must be less than 0.10 otherwise, it is not considered consistent (Saaty 1987, 2008). CR value was calculated using equation (1):

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

where RI is the Random Consistency Index, in which the value is given as 1.24 depending on the number of factors in Saaty’s RI table (Table 2); and CI is the Consistency Index, which is calculated using equation (2).

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \tag{2}$$

$$CI = \frac{(6.3 - 6)}{6 - 1} = 0.06$$

where λ_{max} is the Principal Eigen Value, and n is the number of factors.

The value of λ_{max} was calculated using the sum of the products between each element of the priority vector and column totals. The value of λ_{max} in this study is 6.30, which according to the conditions of the AHP method, it should be equal to or greater than the number of factors. Since the number of main factors in this study is 6, it satisfies the condition. According to the equation (2), the consistency ratio (CR) value in this study is 0.05, which $0.05 < 0.10$, so it is consistent, and there is no contradiction in the calculation of weights. The consistency ratio values for sub-factors were also calculated, and all values complied with the condition $CR < 0.10$ indicating that a consistent matrix was formed. Accordingly, the determined factor weights were accepted to use in the fourth step, which is synthesis using weighted linear combination.

Table 2. Random consistency index (Saaty 1987)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R. I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2.3.3. Weighted linear combination (WLC)

WLC is the most prevalently used multi-criteria evaluation analysis method in GIS (Siefi et al. 2017, Malczewski 2000). Land-use suitability analysis using weighted overlay method leads to more rational urban planning decision-making. Weighted overlay analysis includes different data layers with various aspects. In this method, manipulation of the overlay process is allowed by assigning different weights for each input layers, so the factors that play a more critical role will have a more significant impact on shaping the outcome of the overlay analysis. This is the advantage of weighted overlay over other methods such as fuzzy overlay, binary overlay, or ranking overlay (Malczewski 2006). However, this

method is highly dependent on the determination of factor weights, where highly favored factors will result in higher values in the final output raster. This issue is critical, so experts’ opinion is crucial in the defining scales applied to input layers and weights given to factors in the AHP process.

To be able to combine the attribute of layers and perform calculations on them, before executing the weighted overlay, all vector criteria layers were converted to raster format. Since the WLC method requires all values which are included in different attribute layers to be transformed to a comparable unit, all the criteria layers had already been normalized in the scale of 1 to 5 (see Figure 3). Table 3 shows the influence weight of factors which were determined based on the literature review, experts’ opinion, and

AHP method. Safety issues are extremely important in urban planning; thus, the safety factor was given primary weight (25%) in the analysis. Secondary weighting (20%) was given to the slope factor due to the significance of topography in urban planning. The remaining weights are 15% and 10%, where the sum of the criteria weights must be equal to 100.

In the fourth step, weighted overlay analysis was performed on sub-criteria layers using their defined weights to produce the main criteria maps. Finally, the overall weighted linear combination was performed using equation (3),

and as a result, the final suitability map was produced.

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i * \prod C_j \tag{3}$$

where S is the composite suitability score, W_i is weights assigned to each factor, X_i is factor scores (normalized cell values), C_j is constraints (built-up areas, wetlands, risky regions, and protected areas), and \prod is the product of constraints.

Table 3. Influence weight of factors (contributed in weighted overlay analysis) determined using AHP method.

Planning criteria	Sub-criteria	Sub-criteria weight	Criteria weight
Safe city	Geology	30	25
	Fault line	35	
	Streams	35	
Socio-economic/ City of equality	Proximity to educational institutions	50	15
	Proximity to health services	50	
Ecological and environmental	Land cover	60	15
	Protected area	40	
Topography	Slope	100	20
Connected city	Proximity to roads	100	10
Compact city	Proximity to established neighborhood (built-up)	100	15

The Model Builder tool was used in the ArcGIS environment for producing the suitability model (see Appendix A). Model Builder is also known as a visual programming language that automates the GIS workflow; it facilitates constructing and executing simple workflows to develop and run reusable and complex geoprocessing models (HTTP. 3). The model builder expedites model sharing and allows to integrate ArcGIS with other applications. The tool not only makes the analyzing process dynamic but also enables the user to change the input criteria, values, weights, and quickly test multiple alternative scenarios.

1. Results and Discussion

In order to determine the most suitable land

for sustainable urban development, a GIS-based multi-criteria decision evaluation method by integrating AHP and WLC was used to analyze and evaluate the selected criteria scores. Each criteria map was preprocessed and prepared for geospatial analysis using ArcGIS spatial analyst tools. Using the normalized score values, the maps were converted into grid format. The suitability maps were derived using the wight values obtained from AHP and the weighted overlay function of ArcGIS software. The results of the weighted overlay based on similar groups are given in Figure 4. The suitability maps were classified into five categories, i.e., high suitability, moderate, low, very low, and not suitable.

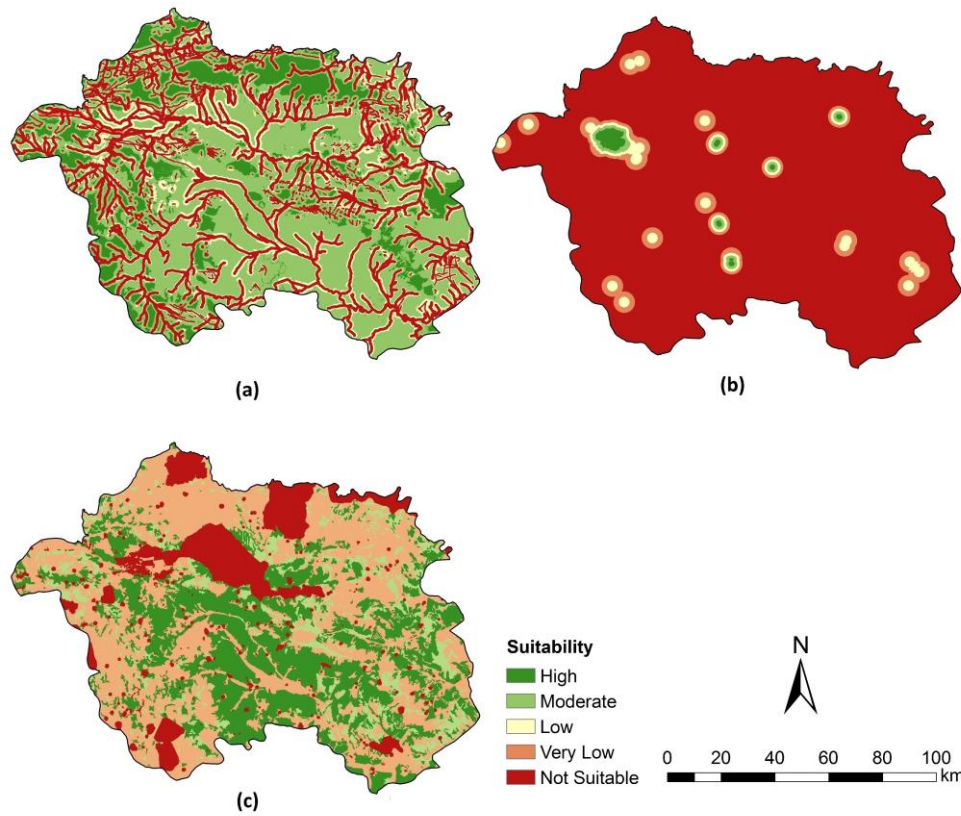


Figure 4. Suitability map based on similar factors: (a) weighted safe city map; (b) weighted socio-economic map; and (c) weighted ecological & environmental map.

The final land suitability map was calculated and produced by aggregating all factor maps and their computed weights using the weighted linear

combination approach. Figure 5 shows the final suitability map of sustainable urban development in Eskisehir city.

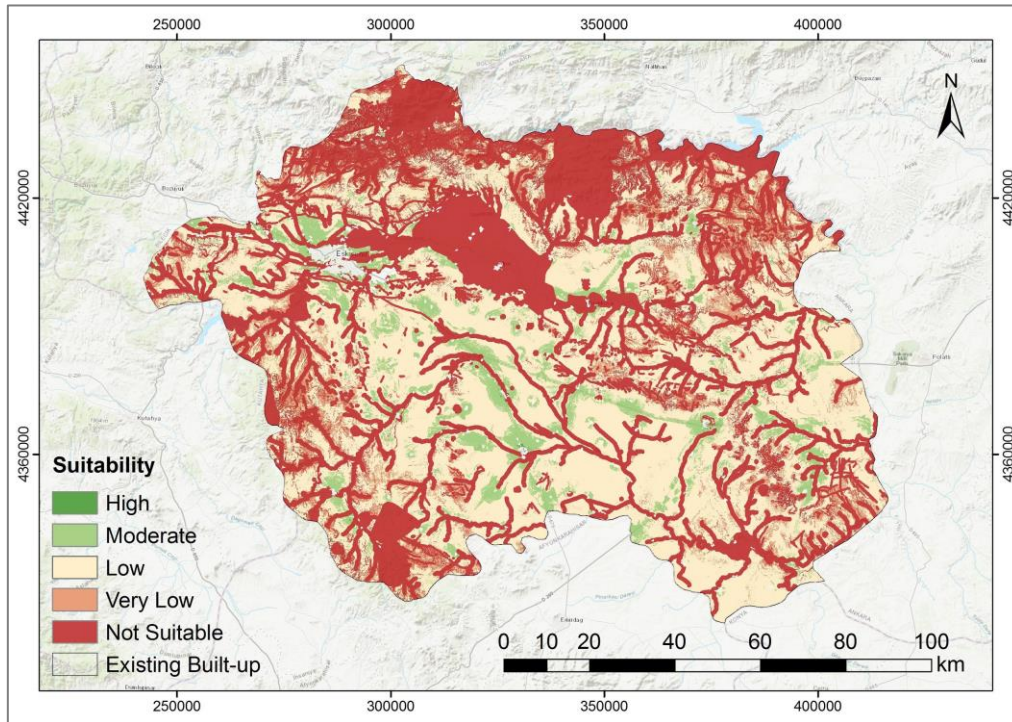


Figure 5. Final suitability map of sustainable urban development in Eskisehir city

Figure 6 illustrates the percentage and magnitude of areas shown in the final suitability map. Based on defined criteria, the findings of this study show that the largest area has low suitability with a rate of 44 %, while areas which are not suitable, represent 42 % of the total area. Areas with the highest suitability were rarely found (0.01 %). Areas with moderate suitability grade,

form 7 % (964.06 km²) of the total area, which is composed of well-connected areas. As Figure 5 & 6 illustrate, although adequate land with high suitability was not found, moderately suitable areas (shown in light green) can be used as potential candidate areas for future sustainable urban growth. Those areas comply with the aims of the study.

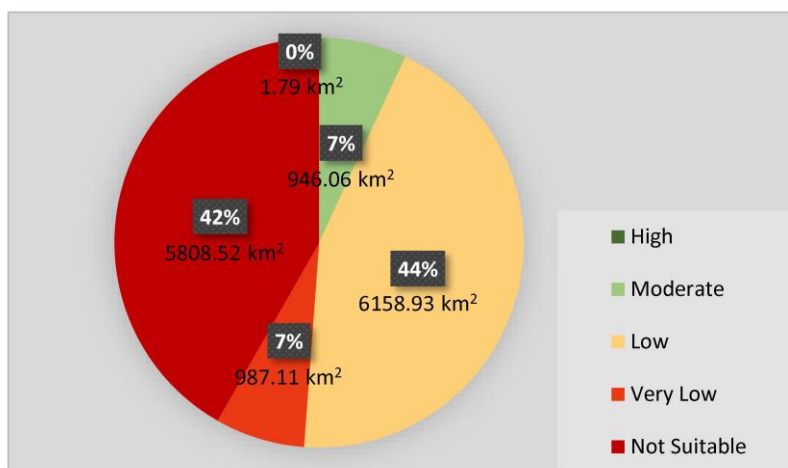


Figure 6. Pie chart showing land suitability areas in five suitability categories.

However, MCDA sometimes raises subjectivity in choosing the criteria and defining the weight of each factor, but the selection of criteria weights

based on expert's opinion in the initial step increases the consistency of the results. The final step of multi-criteria evaluation is the validation of

results. The following issues must be considered during the verification process:

- A field survey (ground truth verification) should be conducted to verify sample areas.
- Sensitivity analysis should be performed on the resultant map by altering the number of criteria and the respective weights of the factors to examine their influence on the result (by taking advantage of the model builder, this process is much easier).
- Reasonability and reflection of reality by the resultant map.

In this study, after obtaining the final suitability map, in addition to the analyses by changing criterion numbers and corresponding weights, visual observations were performed to evaluate and validate the results. The results were compatible with our field observations. Areas with high and moderate suitability are in proximity to established built-ups, major roads, and education and health services; these areas are neither located in protected areas nor prone to natural hazards. The findings reveal that unsuitable and less suitable areas such as forest, protected areas, and agriculture lands cover nearly half of Eskisehir, which means that using AHP and GIS techniques can significantly help to save the ecosystem in creating future sustainable development plans. This will highly reduce the negative impacts on the ecosystem and environment. The results also revealed that the main constraints to the development of the city are conservation areas and geohazards such as flood hazards, geological faults, materials, and steep slopes.

The finding of this study is consistent with the results of Aburas et al. (2017). They considered four main criteria (socio-economic, environment, utilities, and physical factors). In their findings, they indicated that using AHP and GIS technique is crucial in sustainable urban development.

Chen (2016) also used GIS-based MCDA in land-use suitability analysis for urban development. The method was found very effective in the complex process of sustainable urban development. Chen focusing on planning a compact city, concluded that the combination of

MCDA and GIS in land-use decision support systems reduce both the time needed for the analysis of criteria and the errors. Our conclusion agrees with Chen's findings.

Akbulut et al. (2018) also applied the same method in Turkey. They recommended that the method can be replicated in other regions. It can help as a suitability evaluation framework for assessing the future urbanization plans on its broader implications for ecosystem services and sustainability functions. They concluded that by taking sustainability aspects into account, the consequences of eroding ecosystem resources, such as the increased risk of landslides, floods, and biodiversity loss, become evident and measurable to decision-makers.

Although criteria differ from study to study, in general, the findings of this study and the results of the previous research works indicate a common point that the integrated AHP and GIS approach can serve as a powerful suitability analysis and evaluation tool for preserving nature and sustainable development. This study provides basic information and awareness of sustainable urban expansion using GIS and RS to decision-makers and highlights the significant hazards and constraints that the city is facing. For harmonized and successful land-use planning, a multidisciplinary study and adequate data are required to protect the natural environment and reduce hazards. Lack of such an approach can lead to catastrophic hazards and failure of structures. This research represents only the first stage of the strategic planning process. In order for the identified areas of land to strongly contribute to the city's sustainability achievement goal, it is crucial that the model's fundamental principles also resonate in the detailed urban design phase of the planning process (Chen 2016). In this respect, GIS will continue to play an important role.

4. Conclusions

In this study, a GIS-based land suitability analysis based on critical factors was conducted to find the most suitable areas for sustainable urban development in Eskisehir province. To achieve the

aim of the study, GIS and AHP were integrated; geophysical, cultural, socio-economic, and remotely sensed data were used. The results of the analysis revealed that for the selected criteria with the aim of economic and sustainability, there is an insufficient optimum area (1.79 km²) available for urban growth, but regions with moderate suitability were found in a considerable total area (964.06 km²), which those areas can be used for the future urban expansion. The results strengthen the effectiveness of using geospatial technology, particularly the use of GIS-based multi-criteria decision analysis in complex scenarios such as urban planning and environmental management, which can significantly impact the safety, sustainability, and the general quality of life in the city. GIS and remote sensing techniques can be used in many ways to protect the environment and promote economic development. Since using GIS in the urban planning process allows many factors to be taken into account, it helps to build an efficient, safe, economical, and organized city. The study provides decision-makers with fundamental information and insight into sustainable urban development using GIS and RS and highlights the major hazards and constraints that the city is facing. The results revealed that the main constraints to the sustainable development of the city are conservation areas and geohazards.

5. References

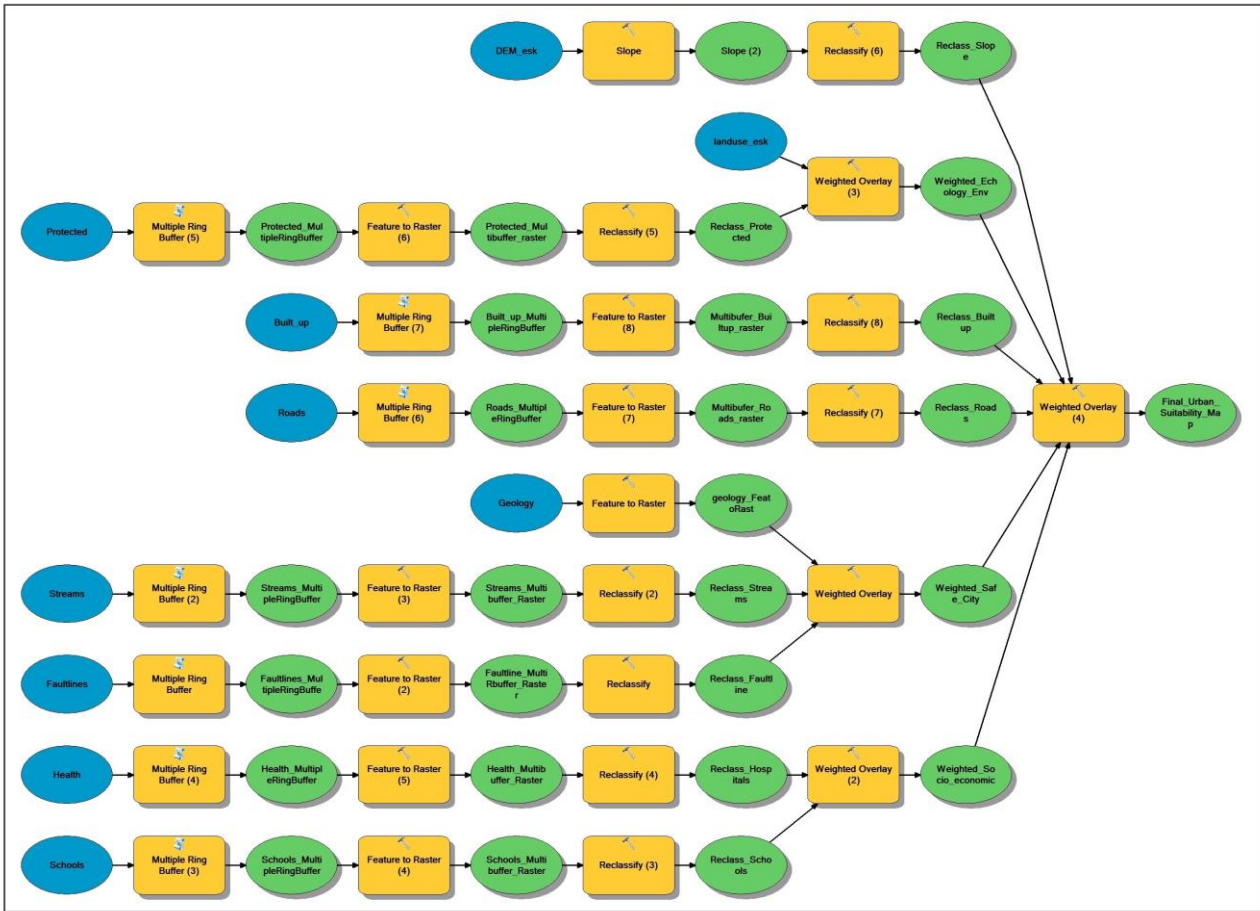
- Aburas, M.M., Abdullah, S.H., Ramli, M.F. and Asha'ari, Z.H., 2017. Land suitability analysis of urban growth in Seremban Malaysia, using GIS based analytical hierarchy process. *Procedia engineering*, **198**, 1128-1136.
- Aburas, M.M., Abdullah, S.H., Ramli, M.F. and Ash'aari, Z.H., 2015. A review of land suitability analysis for Urban growth by using the GIS-based analytic hierarchy process. *Asian Journal of Applied Sciences*, **3**, 2321–0893.
- Akanbi, A.K., Kumar, S. and Fidelis, U., 2013. Application of Remote Sensing, GIS and GPS for efficient Urban Management Plan, A case study of part of Hyderabad city. *arXiv preprint arXiv:1312.4932*.
- Akbulut, A., Ozcevik, O. and Carton, L., 2018. Evaluating suitability of a GIS–AHP combined method for sustainable urban and environmental planning in Beykoz district, Istanbul. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, **13**, 1103-1115.
- Ağaçsapan, B. and Çabuk, S. N., 2016. Geographical information systems in solid waste management: a case study for site selection for waste transfer stations in Eskisehir. Master's thesis, Anadolu University, Graduate School of Sciences, Eskişehir, Turkey 192.
- Blaschke, T. and Merschdorf, H., 2014. Geographic information science as a multidisciplinary and multiparadigmatic field. *Cartography and Geographic Information Science*, **41**, 196-213.
- Bozdağ, A., Yavuz, F. and Günay, A.S., 2016. AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) County. *Environmental Earth Sciences*, **75**, 1-15.
- Chen, S., 2016. Land-use suitability analysis for urban development in Regional Victoria: a case study of Bendigo. *Journal of Geography and Regional Planning*, **9**, 47-58.
- Culshaw, M.G. and Price, S.J., 2011. The 2010 Hans Cloos lecture: the contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, **70**, 333-376.
- Doğan, Y. and Yakar, M., 2018. GIS and Three-Dimensional Modeling for Cultural Heritages. *International Journal of Engineering and Geosciences*, **3**, 50-55.
- FAO, 1993. Guidelines for land-use planning, 1, Food and Agriculture Organization of the United Nations (Rome), 1-96.
- FAO, 2007. Land evaluation: towards a revised framework; Land and Water Discussion, 148, Food and Agriculture Organization of the United Nations (Rome), 428–429.

- Kumar, M. and Shaikh, V.R., 2013. Site suitability analysis for urban development using GIS based multicriteria evaluation technique. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **41**, 417-424.
- Malczewski, J., 2000. On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, **4**, 5-22.
- Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, **20**, 703-726.
- Nguyen, T.T., Verdoodt, A., Van Y, T., Delbecque, N., Tran, T.C. and Van Ranst, E., 2015. Design of a GIS and multi-criteria based land evaluation procedure for sustainable land-use planning at the regional level. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **200**, 1-11.
- Ouma, Y.O. and Tateishi, R., 2014. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*, **6**, 1515-1545.
- Saaty, R.W., 1987. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, **9**, 161-176.
- Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, **1**, 83-98.
- Scholten, H.J. and Stillwell, J. eds., 2013. Geographical information systems for urban and regional planning, 17, Springer Science & Business Media, 1-281.
- Siefi, S., Karimi, H., Soffianian, A. and Pourmanafi, S., 2017. GIS-based multi criteria evaluation for thermal power plant site selection in Kahnuj County, SE Iran. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **50**, 179-189.
- Taranto, T.J., 2007. Using spatial information to aid decision-making: Case study of developing a participatory geographic information system for regional tourism planning. *Journal of spatial science*, **52**, 23-34.
- Tudes, S., 2012. Correlation between geology, earthquake and urban planning. In Tech Europe, 417-434.
- DESA, U.N., 2014. World urbanization prospects: the 2014 revision. 366, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York.
- Van Assche, K., Beunen, R., Duineveld, M. and de Jong, H., 2013. Co-evolutions of planning and design: Risks and benefits of design perspectives in planning systems. *Planning Theory*, **12**, 177-198.
- Beatley, T. and Wheeler, S.M., 2004. The sustainable urban development reader. Routledge.
- Yeh, A.G.O., 1999. Urban planning and GIS. *Geographical information systems*, **2**, 877-888.

Internet sources

- 1- <http://www.turkstat.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>, (18. 12. 2018)
- 2- <http://www.investineskisehir.gov.tr/economy/?lang=en>, (11. 11. 2018)
- 3- <https://www.esri.com>, (12.11.2018)

Appendix



Appendix A. Workflow of the land suitability analysis for sustainable urban development in ArcGIS

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045601 (651-671)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045601 (651-671)

DOI: 10.35414/ akufemubid.710126

Araştırma Makalesi / Research Article

Karlı Dağlık Bir Havzada Günlük ve Aylık Akım Değerlerinin SWAT Modeliyle Değerlendirilmesi: Bitlis Çayı Havzası Örneği

Emrah YALÇIN¹¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırşehir.

e-posta: emrah.yalcin@ahievran.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3742-8866>

Geliş Tarihi: 27.03.2020

Kabul Tarihi: 26.08.2020

Öz

Bu çalışmada, yerel meteoroloji istasyonlarının günlük meteorolojik ölçümleri ile kaba ölçekli topoğrafya, arazi örtüsü ve toprak verileri kullanılarak oluşturulan bir SWAT modelinin, karlı dağlık bir havzada günlük ve aylık akım değerlerini simülasyon ve tahmin performansı Bitlis Çayı örneğinde değerlendirilmiştir. Fırat-Dicle havzasında yer alan Bitlis Çayı'nın Baykan akım gözlem istasyonu yerindeki akım değerlerini simüle edebilmek için geliştirilen SWAT modeli, Baykan istasyonunun ölçüm verileri kullanılarak günlük ve aylık akım simülasyonları için ayrı ayrı kalibre edilip doğrulanmıştır. Hem kalibrasyon hem de doğrulama periyodunda günlük akım değerleri için iyi, aylık akım değerleri için ise çok iyi olarak nitelendirilebilecek simülasyon istatistikleri elde edilmiştir. Geliştirilen modelin, akım ölçümleri olmadan sadece meteorolojik veriler kullanılarak günlük ve aylık akımları ne derece doğru tahmin edilebileceği incelendiğinde ise modelin hem istatistiksel değerlendirme indeksleri hem de akım-süreklilik ilişkileri bağlamında tatmin edici tahmin performansları sunabildiği görülmüştür. Günlük akım tahminleri ile ölçüm verileri arasında yıllık maksimum zaman serileri bağlamında güçlü bir korelasyon elde edilememiş olsa da bu durumun hesaplanan tekerrürlü taşkın debileri bağlamında belirgin farklar yaratmadığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen SWAT modelinin, gelecek on yıllarda Bitlis Çayı'nın akım rejiminde meydana gelebilecek olası değişimlerin günlük ve aylık bazda incelenebilmesine olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler

Hidrolojik model;
SWAT; SWAT-CUP;
Günlük ve aylık akım;
Kar erimesi; Bitlis Çayı

Evaluation of Daily and Monthly Streamflow Rates in a Snowy Mountainous Watershed with SWAT Model: A Case of Bitlis Creek Basin

Abstract

In this study, the performance of a SWAT model constructed with daily weather observations of regional meteorological stations and coarse-scale topography, land cover, and soil data in simulating and forecasting daily and monthly streamflow rates in a snowy mountainous watershed is assessed with the example of Bitlis Creek. The SWAT model developed to simulate the flow rates of Bitlis Creek, located in the Euphrates-Tigris Basin, at the location of the Baykan stream-gauging station is calibrated and validated separately for daily and monthly flow simulations by using the records of the Baykan station. Simulation statistics that can be judged as good for daily flow rates and very good for monthly flow rates are obtained in both of the calibration and validation periods. When it is examined how accurately the developed model can predict the daily and monthly flows using only meteorological data without flow measurements, it is observed that the model can provide satisfactory forecast performances in the context of both statistical evaluation indices and flow-duration relations. Although a strong correlation between the daily flow estimates and observed data in terms of annual maximum time series cannot be obtained, it is observed that this situation does not result in significant differences in terms of the calculated recurrence flood peaks. The results indicate that the developed model can enable the investigations of possible changes in the flow regime of Bitlis Creek in the coming decades on daily and monthly time bases.

Keywords

Hydrologic model;
SWAT; SWAT-CUP;
Daily and monthly
streamflow; Snowmelt;
Bitlis Creek

1. Giriş

Atmosferde giderek yoğunlaşan sera gazı konsantrasyonları sebebiyle küresel iklim koşullarında meydana gelmesi beklenen değişimlerin, dünyanın birçok yerinde sıcaklık ve yağış paternlerinin büyüklük ve mevsimsel varyasyonunu temelden değiştireceği yaygın olarak kabul edilmektedir (IPCC 2013). Bu değişimlerin akarsu rejimlerinde meydana getirebileceği olası değişiklikler, genellikle tarihsel veriler kullanılarak hazırlanan havza yönetim planlarında tarımsal üretim, içme ve kullanma suyu temini, enerji üretimi gibi amaçlar için öngörülen su arzlarının sağlanamaması ihtimalini doğurmaktadır (Daggupati *et al.* 2017, IPCC 2014). Özellikle kar birikimi ve erime süreçlerinde meydana gelebilecek değişikliklerin, kar yağışından beslenen dağlık havzalarda yer alan barajlarla karşılanacak su ihtiyaçlarının teminindeki kırılganlığı daha da arttıracığı öngörülmektedir (Adam *et al.* 2009). Ayrıca, değişen iklim koşullarının, kuraklık ve seller gibi aşırı olayların şiddeti ve sıklığını da etkileyerek havza depolama gereksinimleri ile baraj işletme politikalarının yeniden değerlendirilmesi hususlarında önemli sonuçlar doğurması muhtemeldir (Katz and Brown 1992). Bu nedenlerle, havza yönetim planlarının, geçmiş akım ölçümlerine değil, olası iklim değişikliği senaryoları için üretilen iklim projeksiyonları bazında elde edilen günlük ve/veya aylık akım tahminlerine göre hazırlanması, olası su arzı kırılganlıklarını minimize etmek için büyük önem arz etmektedir.

Hidrolojik modelleme, havzalarda hidrolojik döngü etkileşimlerini araştırmak için yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Hidrolojik modeller, havza su dengesini düzenleyen toprak tipi, arazi kullanımı, iklim ve havza morfolojisi gibi faktörler ile hidrolojik bileşenler arasındaki ilişkinin kurularak, saha deneyleri ve doğrudan ölçümler yoluyla irdelenmesi mümkün olmayan geçmiş, mevcut ve gelecek dönemlere dair doğal ve yönetimsel kaynaklı çevresel değişimlerin etkilerinin değerlendirilmesini mümkün kılar (Rahaman *et al.* 2019). Son yıllarda uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri teknolojilerinin devreye girmesiyle

birlikte yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri, uydu görüntüleri, radar verileri gibi mekansal veri tabanlarıyla da desteklenen algoritmaların da geliştirilmesiyle, kullanılan zamansal ve mekansal ölçekler, farklı süreçlerin sunumu ve kullanılan denklemlere çözüm yöntemleri temelinde kategorize edilebilecek çok sayıda hidrolojik model geçiştirilmiştir (Himanshu *et al.* 2013, Pandey *et al.* 2016, Singh 1995). Arnold vd. (1998) tarafından geliştirilen *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) modeli, nehir havzalarının hidrolojik modelleme çalışmaları için çokça tercih edilen modellerden biridir (Douglas-Mankin *et al.* 2010, Gassman *et al.* 2007).

SWAT, çeşitli çevresel koşullara sahip farklı ölçeklerdeki havzalarda su miktarı, sedimentasyon ve su kalitesi konularını incelemek için yararlı bir araç olduğu kanıtlanmış, model parametrelendirmesini ve kalibrasyonunu zorlaştıran çok sayıda giriş parametresi gerektiren, sürekli zamanlı, yarı dağılımlı ve süreç bazlı bir simülasyon modelidir (Arnold *et al.* 2012). Nihai hedefleri ne olursa olsun, tarihsel akım ve meteorolojik gözlem verileri kullanılarak hedeflenen havzanın akım değerleri bazında hidrolojik dengesinin kurulması tüm SWAT uygulamaları için ilk temel adımdır (Yang *et al.* 2016). Kar erimesi/birikimi hidrolojisi, akımların ağırlıklı olarak kar erimesi kaynaklı olduğu havzalarda önemli bir bileşendir (Abbas *et al.* 2019, Liu *et al.* 2020). SWAT, her bir alt havza için on adete kadar tanımlanabilen yükseklik bantları ile bunlara ilişkin sıcaklık ve yağış değişim oranlarının belirlenerek, karla ilgili süreçlerin mekansal ve mevsimsel olarak değerlendirilebildiği bir kar modülü içermektedir (Fontaine *et al.* 2002, Luo *et al.* 2012, Pradhanang *et al.* 2011, Rahman *et al.* 2013).

SWAT uygulamalarının büyük çoğunluğu yağmur-akım ilişkisinin baskın olduğu havzalarda gerçekleştirilmiştir (Douglas-Mankin *et al.* 2010, Gassman *et al.* 2007). Karla kaplı havzalar için gerçekleştirilen uygulamalar ise sınırlı olup, özellikle ilkbahar akımlarının ağırlıklı olarak kar erimesi kaynaklı olduğu dağlık havzalar için SWAT

model performansı hakkında çok az şey bilinmektedir (Ahl *et al.* 2008, Grusson *et al.* 2015, Liu *et al.* 2020, Omani *et al.* 2017, Stratton *et al.* 2009, Troin and Caya 2014). Dağlık bir havzada kar erimesi-akım modellemesi, simülasyonun karmaşıklığı nedeniyle zor olarak görülmektedir (Abbas *et al.* 2019). Troin ve Caya (2014), başarısız performansların nedeninin, SWAT'ın yaz ve kış akımlarını uzlaştırmadaki zorluklarından kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Stratton vd. (2009) ise daha iyi bir modelleme için toprak (örneğin; mevcut su içeriği ve doymuş hidrolik iletkenlik), kar (örneğin; değişim oranları ve erime) ve vejetasyon (örneğin; yaprak alan indeksi, maksimum kaplama indeksi) ile ilgili model parametreleri için saha ölçümlerinin öneminden bahsetmiştir.

Gassman vd. (2007), SWAT modeli kullanılarak gerçekleştirilen 115 akım simülasyonu çalışmasını kapsamlı bir şekilde gözden geçirmiş ve bu çalışmaların bazılarında elde edilen başarısız simülasyon sonuçlarının; model kurulumunda düşük çözünürlüğe sahip mekansal verilerin kullanılması, kullanılan meteoroloji istasyonlarının mekansal dağılımının doğru yapılmaması, tarihsel akım ölçümlerindeki hatalar, model kalibrasyonunun yapılmaması ile nispeten kısa kalibrasyon ve doğrulama periyotları kaynaklı olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, aylık ve yıllık zaman ölçütlerinde yapılan akım simülasyonlarında elde edilebilen başarının günlük akım simülasyonlarında çoğu zaman elde edilemediği belirtilmektedir (Gassman *et al.* 2007, 2014). SWAT modeli kurulumu için gerekli mekansal veri setleri; sayısal yükseklik modeli, arazi kullanım/arazi örtüsü haritası ile toprak haritası olup, model sonuçlarının mekansal veri kalitesine olan yüksek hassasiyeti bilinmektedir (Al-Khafaji and Saeed 2018, Geza and McCray 2008, Tan *et al.* 2018). Bu noktada, eğer model kalibrasyonu ve doğrulaması için yeterli akım gözlem verisi mevcut ise model kurulumunda temini için çok fazla zaman, çaba ve bütçe gerektiren saha ölçüm ve analizleri baz alınarak hazırlanmış yerel mekansal veri setleri yerine küresel kapsamlı açık erişim veri tabanlarından elde edilen düşük çözünürlüklü veri setleri kullanılarak,

model kalibrasyonu ile bu veri setlerinin yarattığı belirsizliğin azaltılıp azaltılamayacağı sorusu, özellikle hidrolojik model kurulumunda mekansal veri eksikliğin önemli bir sınırlayıcı faktör olmaya devam ettiği bölgeler için büyük önem arz etmektedir (Sharifi and Kalin 2010).

Bu çalışmada, kurulumunda yerel meteoroloji istasyonu ölçümleri ile küresel kapsamlı açık erişim veri tabanlarından elde edilen düşük çözünürlüklü mekansal veri setleri kullanılan bir SWAT modelinin yoğun kar yağışı ve birikimi gözlenen dağlık bir havzada günlük ve aylık akım değerlerini simülasyon ve tahmin performansı, Dicle Nehri'nin ana kollarından biri olan Bitlis Çayı örneğinde değerlendirilmiştir. İklim değişikliği etkileriyle yüzyıl sonuna kadar yıllık toplam akım miktarlarında %25 ila %55 arasında bir azalma potansiyeline sahip olan bir havzada yer alan Bitlis Çayı üzerinde, Baykan akım gözlem istasyonu (AGİ) tarihsel akım ölçümleri kullanılarak planlanan beş hidroelektrik santral (HES) projesi bulunmaktadır (Bozkurt and Sen 2013, İnt Kyn. 1). Uzun yıllar Bitlis Çayı akımlarının ölçüldüğü Baykan istasyonu havzası için geliştirilen SWAT modeli, AGİ ölçüm verileri kullanılarak günlük ve aylık akım değerleri için ayrı ayrı kalibre edilip doğrulanmış ve model simülasyon performansları, AGİ verileri baz alınarak belirlenen en iyi simülasyon sonuçlarına göre istatistiksel değerlendirme indeksleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. AGİ ölçümleri olmadan yalnızca meteorolojik veriler kullanılarak gerçekleştirilebilecek model simülasyonlarının akım tahmin performansları, kalibrasyon süreçleri sonunda elde edilen kalibre parametre değer aralıkları ve bu değer aralıklarında en iyi simülasyonu veren parametre değer setlerinin kullanılabilirliği irdelenerek değerlendirilmiştir. Bu kapsamda iki farklı yaklaşımla belirlenen günlük ve aylık akım tahminleri hem istatistiksel değerlendirme indeksleri hem de akım-süreklilik ilişkileri ile yıllık maksimum değer serileri bağlamında değerlendirilerek, bu tahminlerin havza HES projelerinin kurulu güç optimizasyonları ve güvenilir enerji hesaplamaları ile taşkın yapılarının boyutlandırılmasında kullanılıp kullanılamayacağı tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma alanı

Bitlis Çayı havzası, Türkiye'nin doğusunda yer alan Bitlis ve Siirt il sınırları içerisinde takriben 41°36'-42°15' doğu boylamları ile 37°54'-38°30' kuzey enlemleri arasında konumlanmaktadır. Garzan, Botan ve Batman çaylarıyla birlikte Dicle Nehri'nin Türkiye sınırları içerisindeki dört ana kolundan biri olan Bitlis Çayı, Bitlis il merkezi civarında, takriben 1500 m kotlarında, bir ırmak karakteri kazanarak büyük bir eğimle güneye doğru akar ve 500 m kotlarında Kezer Çayı ile birleşerek 450 m kotlarında Botan Çayı'na karışır. Güneydoğu Toroslar sıradağ zinciri üzerinde yer alan Bitlis Çayı havzası, büyük bir kısmı 1500-2000 m yüksekliğinde ve genellikle volkanik ve kalker kayalardan teşekkül eden yaklaşık 1076 km²'lik bir yağış alanına sahiptir (EİE 1990). Bitlis Çayı üzerinde mevcut durumda işletme halinde herhangi bir hidroelektrik santral (HES) projesi bulunmamakla birlikte, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) ve tüzel kişiler tarafından geliştirilmiş olan toplam yaklaşık 143 MW kurulu güce sahip Deliktaş Regülatörü ve HES, Bitlis Regülatörü ve HES, Baykan Enerji Grubu (Baykan Barajı ve HES ile Baykan II Regülatörü ve HES) ile Başören Barajı ve HES projelerinin yapımı planlanmaktadır (Şekil 1) (EİE 1990, Yolsu 2009, İnt Kyn. 1).

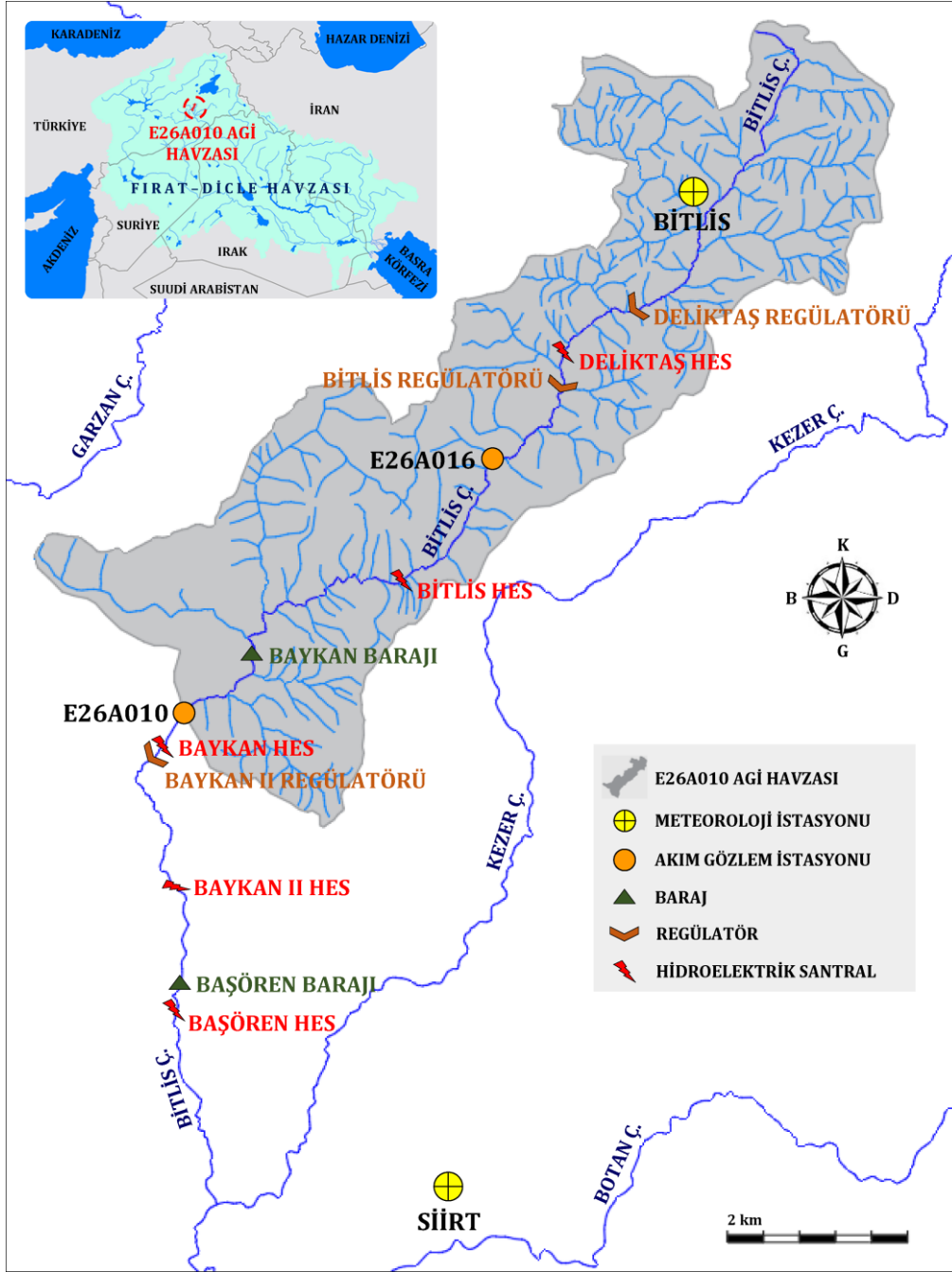
Bitlis Çayı üzerinde iki adet AGİ bulunmaktadır (Şekil 1). EİE tarafından işletilmiş olan 1145 m kotundaki E26A016 numaralı Karınca AGİ'de sadece 1965-1970 yılları arasında akım gözlemleri yapılmıştır. 346,4 km²'lik yağış alanına sahip bu istasyon 1971 yılından bu yana kapalı durumdadır. Yine EİE tarafından işletilmiş olan 698 m kotundaki E26A010 numaralı Baykan AGİ'nin ise 1955-2011 tarihleri arasında kesintisiz akım gözlemleri mevcuttur (İnt Kyn. 2). EİE'nin kapatılması sonucu EİE tarafından işletilen AGİ'lerin 2012 yılı itibariyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğüne (DSİ) devri sonrasında, 636,5 km²'lik yağış alanına sahip bu istasyonda akım gözlemleri DSİ tarafından devam ettirilmektedir (İnt Kyn. 2). Bitlis Çayı üzerinde planlanan depolamalı (baraj) ve nehir tipi HES

projelerinin istikşaf ve fizibilite çalışmalarında E26A010 numaralı Baykan AGİ'nin akım verilerinden faydalanılmıştır (EİE 1990, Yolsu 2009).

Özellikle farklı iklim kuşaklarının kesiştiği bir noktada yer almasından dolayı mikro-klima özelliği gösteren Baykan AGİ havzası, Türkiye'nin en fazla kar yağışı alan bölgelerinden biridir (Aydın and Işhik 2015). Havzanın kuzeyinde, özellikle Bitlis ili civarında, şiddetli karasal iklim hüküm sürmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen 1573 m rakımlı 17207 numaralı Bitlis Meteoroloji Gözlem İstasyonu (MGİ) verilerine göre; yıllık ortalama sıcaklık 9,4°C, yıllık toplam yağış ortalaması 1206,2 mm, yıllık karla örtülü gün sayısı ortalaması 115,9 gün ve aylık ortalama kar yükseklikleri 4,5 cm ila 87,3 cm arasında değişmekte olup, 5 m kalınlığa kadar ulaşabilen kar örtüsünün bahar aylarından itibaren kalkmaya başladığı görülmektedir (Aydın ve Yaylak 2016, EİE 1990, MGM 2018a). 696 m ila 2610 m arasında değişen ortalama 1619 m yükseltiye sahip Baykan AGİ havzasının güney kesimlerini temsil edebilecek havza çevresindeki en yakın meteoroloji istasyonu olan yine MGM'ye ait 895 m rakımındaki 17210 numaralı Siirt MGİ'de ise yıllık ortalama sıcaklık 16,2°C, yıllık toplam yağış miktarı 719,9 mm, yıllık karla örtülü gün sayısı ortalaması 29,1 gün ve aylık ortalama kar yükseklikleri 4,7-13,5 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 1) (MGM 2018b).

2.2. SWAT modelinin kurulumu

SWAT modeli kurulumu için gerekli dört ana veri seti; sayısal yükseklik modeli, arazi kullanım/arazi örtüsü haritası, toprak haritası ve havza içi/yakınlarında bulunan temsili meteoroloji istasyonlarının günlük meteorolojik gözlemleridir. Havzanın topoğrafik karakteristikleri ile arazi kullanımı ve toprak tipleri hakkındaki verilerin temini, küresel kapsamlı açık erişim veri tabanlarından sağlanmıştır. 1 yay-saniye çözünürlüklü (yaklaşık 30 m) sayısal arazi yükseklik verisi, küresel kapsamlı *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) veri tabanından elde edilmiştir (İnt Kyn. 3). Havza toprak özellikleri, 1:5 milyon ölçekli *Digital Soil Map of the World* (DSMW) versiyon 3.6



Şekil 1. Çalışma alanının konum haritası.

veri tabanından çekilmiştir (İnt Kyn. 4). Arazi kullanım/arazi örtüsü haritası, 1 km mekansal çözünürlüklü *Global Land Cover (GLC2000)* versiyon 2.0 veri tabanından elde edilmiş ve SWAT model girdi gereksinimlerine göre yeniden sınıflandırılmıştır (İnt Kyn. 5). Model yapımında ihtiyaç duyulan günlük meteorolojik gözlemler için ise Şekil 1’de havzaya göre konumları gösterilen Bitlis ve Siirt MGİ’lerin ölçümlerinden faydalanılmıştır (MGM 2018c, MGM 2018d). Baykan AGİ’nin 1955-2015 periyodunda 60 yıllık akım gözlemleri mevcut olsa da Bitlis ve Siirt

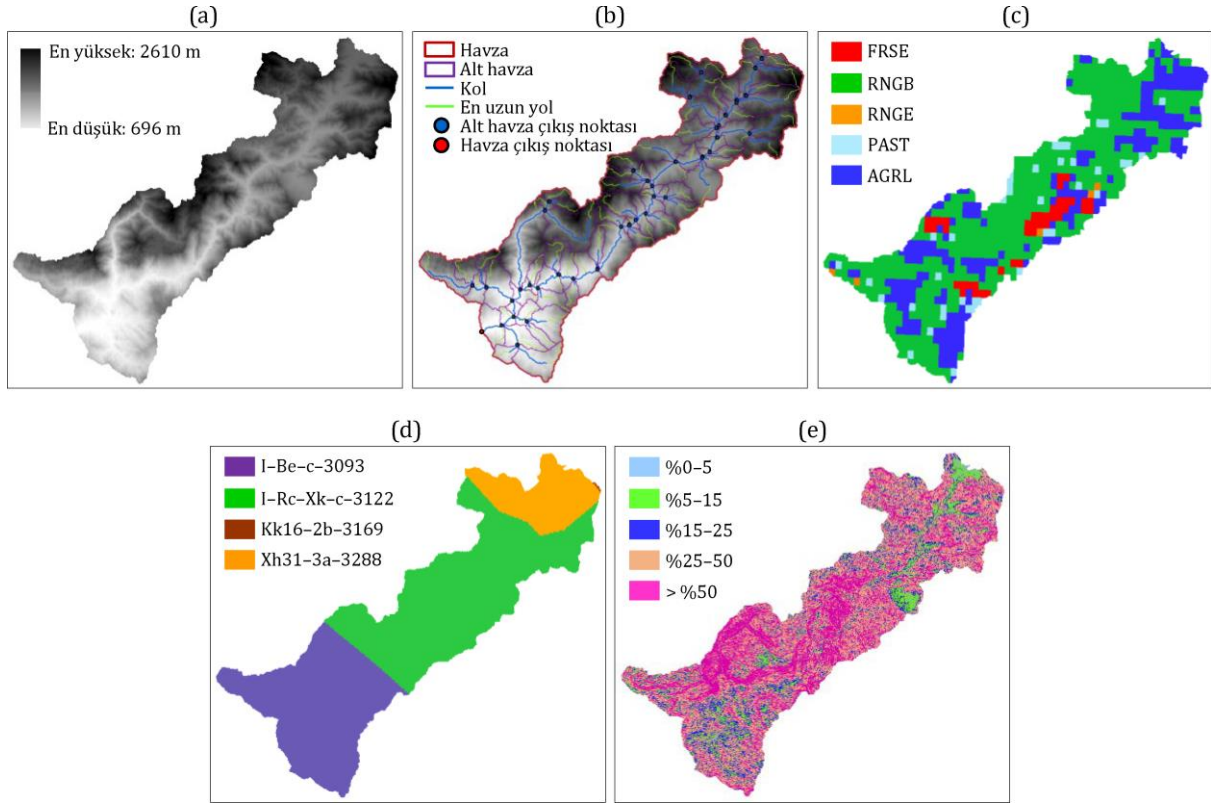
MGİ’lerin söz konusu periyotta kesintisiz yağış (mm), maksimum ve minimum hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), güneş ışınması (MJ/m^2), rüzgar hızı (m/s) ve bağıl nem ile ilgili günlük meteorolojik parametre kayıtları bulunmamaktadır. Buna göre, meteorolojik istasyon verilerinde en az kesintiye sahip en uzun periyot olan 1 Ocak 1984 - 31 Aralık 2009 dönemi, Baykan AGİ yerinde doğal akış paterninin henüz bozulmamış olduğu Bitlis Çayı akımlarını günlük ve aylık bazda simüle etmek için geliştirilecek SWAT modelinin analiz periyodu olarak belirlenmiştir.

SWAT modelinin kurulumu, SWAT havza tanımlama menüsüne girdi olarak sunulan sayısal yükseklik modeli verisi kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilen havza tanımlama işlemiyle başlamıştır (Şekil 2a). Bu aşamada, Başkan istasyonu havzası için 81 alt havza tanımlanmış ve bu alt havzalar için eğim değişimi, arazi eğim uzunluğu gibi alt havza parametreleri hesaplanmıştır (Şekil 2b). Model kurulumunun ikinci aşamasında, tanımlanan alt havzalar, SWAT hidrolojik etki birimi (HRU) analizi menüsünde otomatik olarak arazi kullanımı, toprak ve topoğrafik eğim karakteristiklerinin tekil kombinasyonlarına sahip HRU'lara bölünmüştür. Bu aşamada ilk olarak, kullanılan sayısal yükseklik modeli ile aynı projeksiyona sahip arazi kullanım/arazi örtüsü haritası grid formatında modele girdi olarak sunulmuş ve GLC2000 veri tabanında tanımlanan kategoriler, SWAT global veri tabanındaki aynı veya benzer birimlerin tanımlarına karşılık gelen altı arazi kullanım sınıfında yeniden tanımlanmıştır (Arnold *et al.* 2013). Bu sınıflar; çeşitli-çalı (RNGB), tarımsal arazi-genel (AGRL), orman-yaprak dökmeyen (FRSE), mera (PAST) ve çeşitli-çayır (RNGE) olup bu arazi kullanım sınıflarının havza alanı kaplama yüzdeleri sırasıyla %62,65, %27,63, %5,26, %3,98 ve %0,48'dir (Şekil 2c). İkinci olarak, DSMW veri tabanından çekilen grid bazlı toprak verisi, model veri tabanı dosyasına DSMW topraklarının özellikleri eklendikten sonra, sayısal yükseklik modeli ve arazi kullanım/arazi örtüsü verileriyle aynı projeksiyonda modele yüklenmiştir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) toprak sınıflandırma sistemine göre lithosol-ötrik cambisol (I-Be-c-3093), lithosol-kalkerik regosol-kalsik xerosol (I-Rc-Xk-c-3122), kalsik kastanozem (Kk16-2b-3169) ve haplik xerosol (Xh31-3a-3288) olmak üzere dört farklı toprak tipinde sınıflandırılan model toprak katmanı Şekil 2d'de sunulmuştur (İnt Kyn. 6). Daha sonra, eğim ayrıştırma işlemi, Şekil 2e'de gösterildiği üzere beş eğim sınıfı göz önüne alınıp, çoklu eğim seçeneği kullanılarak uygulanmıştır. HRU yapılandırılmasında oluşabilecek küçük birimleri elimine edebilmek için arazi kullanımı, toprak ve eğim için sırasıyla %5, %5 ve %15'lik eşik değerler belirlenmiştir. Buna göre, tanımlanan 81 alt havza için toplam 586 HRU

oluşturulmuştur.

Model kurulumunun üçüncü adımında, Bitlis ve Siirt meteoroloji istasyonlarının aylık meteorolojik gözlem istatistikleri ve coğrafi konumları (enlem, boylam ve yükselti bilgileri) model veri tabanı dosyasına eklenmiş ve istasyonların 1 Ocak 1984 - 31 Aralık 2009 dönemi günlük meteorolojik ölçüm verileri modele aktarılmıştır. Yarım saatlik yağış ve çiy noktası sıcaklığıyla ilgili olanlar haricindeki tüm aylık meteorolojik gözlem istatistikleri, WGNmaker4.1.xlsm Microsoft Excel makrosu kullanılarak hesaplanmıştır (İnt Kyn. 7). İstasyonların aylık maksimum yarım saatlik yağış değerleri, aylık maksimum günlük yağış ölçümlerinin yarım saatlik plüvyograf katsayılarıyla çarpılmasıyla belirlenmiştir (MGM 2018e, MGM 2018f). Her ayın ortalama günlük çiy noktası sıcaklıkları ise istasyonların günlük maksimum ve minimum hava sıcaklıkları ile günlük ortalama yüzde bağıl nem verileri kullanılarak DOS tabanlı dew02.exe programıyla hesaplanmıştır (İnt Kyn. 7). İstasyonların rüzgar hızı ve güneş ışıması verilerindeki boşluklar, modelin simülasyon sürecinde aylık meteorolojik gözlem istatistiklerini kullanarak atadığı temsili günlük değerlerle otomatik olarak doldurulacaktır.

SWAT modelinin proje veri tabanı dosyası vasıtasıyla model alt havzalarına yükseklik bantları eklenerek model kurulumu tamamlanmıştır. Bu işlemin amacı, modelin her bir alt havzadaki yüksekliğe bağlı yağış ve sıcaklık değişimlerini hesaba katarak her bir yükseklik bandı için ayrı ayrı kar yağışı ve kar erimesini simüle edebilmesini sağlamaktır (Abbaspour *et al.* 2007). Bu kapsamda, her bir alt havzada minimum ve maksimum yükselti arasındaki farklar hesaplanmış ve yükselti farkının yağış ve sıcaklık üzerindeki orografik etkilerini dikkate almak için oldukça küçük olduğu alt havzalar hariç tüm alt havzalar için beş yükseklik bandı oluşturulmuştur (Pradhanang *et al.* 2011). Yükseklik bantlarının orta nokta yükseltileri (ELEV_B) ile yükseklik bantları içindeki alt havza alan fraksiyonları (ELEV_B_FR), DOS tabanlı Make_ELEV_BAND programı kullanılarak hesaplanmıştır (Abbaspour 2015). Yükseklik



Şekil 2. Model kurulum aşamaları: (a) sayısal yükseklik modeli, (b) havza tasviri, (c) arazi kullanım sınıfları, (d) toprak sınıfları ve (e) eğim sınıfları.

bantlarında kar yağışı ve kar erimesini simüle edebilmek amacıyla sıcaklık değişim oranı (TLAPS) ve yağış değişim oranı (PLAPS) parametreleri için sırasıyla -6 °C/km ve 10 mm H₂O/km değerleri varsayılmıştır. Model proje veri tabanı dosyasına alt havzalar için belirlenen ELEVB, ELEVB_FR, TLAPS ve PLAPS değerleri atanarak SWAT modelinin kurulumu tamamlanmıştır (Arnold *et al.* 2013).

Kurulan SWAT modeli için simülasyon periyodu 1 Ocak 1984 - 31 Aralık 2009 olarak ayarlanmıştır. Bu periyodunun ilk dört yılı istatistiklerin toplanmadığı model ısınma süresi olarak belirlenmiş ve çalışma havzası akım değerleri 22 yıllık bir periyotta (1988-2009) günlük ve aylık bazda ayrı ayrı simüle edilmiştir. Kurulan model, günlük ve aylık ortalama akım simülasyonları bazında ayrı ayrı kalibre edilip doğrulanacağı için, bundan sonra amacı doğrultusunda günlük model ve aylık model adları altında tanımlanacaktır.

2.3. Günlük ve aylık SWAT modellerinin kalibrasyonu ve doğrulaması

Günlük ve aylık modellerin kalibrasyonu ve

doğrulama analizleri *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP) yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Abbaspour 2015). Model kalibrasyonu, doğrulama, hassaslık ve belirsizlik analizleri için SWAT-CUP yazılım paketi içerisinde yer alan *Sequential Uncertainty Fitting Version 2* (SUFI-2) algoritması seçilmiştir (Abbaspour 2015, Abbaspour *et al.* 2004). Model kalibrasyon sürecinde; girdi verileri, model parametreleri, teorik model ve ölçülen akım değerleriyle ilgili tüm belirsizlikler parametre değer aralıkları üzerine dağıtılarak, iteratif bir süreçle ölçülen akım verilerinin çoğunun modelin %95 tahmin belirsizliği (95PPU) bandı içerisinde kalması ve aynı zamanda 95PPU bant kalınlığının da mümkün olduğunca ince olması amaçlanır. Bu noktada, uyum iyiliği P faktörü ve R faktörü ile değerlendirilmektedir (Abbaspour *et al.* 2004). P faktörü, 95PPU bandı içerisinde yer alan ölçüm değerlerinin 0 ile 1 arasında değişen oranı olup, R faktörü ise 95PPU bandının ortalama kalınlığının ölçüm değerlerinin standart sapmasına oranıdır. Daha büyük bir P faktörü değeri sadece daha büyük bir R faktörü değeri ile elde edilebildiğinden iki endeks arasında bir denge kurulmalıdır (Abbaspour *et al.* 2015). Bu bant

aralığında elde edilen en iyi simülasyon performansını değerlendirmek için ise yaygın olarak belirleme katsayısı (r^2) ve ölçüm verileri ile simülasyon sonuçlarının kesişimi sifıra eşit olan lineer regresyon çizgisinin eğiminin (b) çarpımı olan br^2 , Nash-Sutcliffe katsayısı (NSE), yüzde sapma (PBIAS) ve kök ortalama karesel hatanın ölçüm verisinin standart sapmasına oranı (RSR) istatistikleri kullanılmaktadır (Abbaspour *et al.* 2015, Moriasi *et al.* 2007).

Baykan AGİ'de ölçülen günlük ve aylık akım değerleri ile onlara karşılık gelen simüle değerlerdeki farklılıkların büyüklük ve dinamiklerini bir arada göz önüne alabilmek amacıyla, SUFI-2 optimizasyon prosedürünün hedef fonksiyonu olarak br^2 seçilmiştir (Glavan and Pintar 2012). Günlük ve aylık modellerin kalibrasyonu için 1988-2001 periyodu, kalibre modellerin doğrulanması için ise 2002-2009 periyodu baz alınmıştır. Model kalibrasyonları, parametre etkileşimi ve tanımlanabilirlik sorunlarından kaçınmak amacıyla üç aşamada gerçekleştirilmiştir: (1) yağış ve sıcaklık değişim oranı parametrelerinin kalibrasyonu ve bu parametrelerin en iyi simülasyon değerlerine sabitlenerek kalibrasyon sürecinden çıkarılması, (2) hassas kar parametrelerinin kalibrasyonu ve bu parametrelerin en iyi simülasyon değerlerine sabitlenerek kalibrasyon sürecinden çıkarılması ve (3) model proje veri tabanının hidrolojik etki birimi seviyesi yeraltı suyu (.gw), toprak (.sol), hidrolojik etki birimi (.hru) ve yönetim (.mgt) girdi dosyaları ile alt havza seviyesi ana kanal (.rte) ve havza seviyesi havza (.bsn) girdi dosyalarında yer alan diğer hassas model parametrelerinin kalibrasyonu (Abbaspour *et al.* 2007, Abbaspour *et al.* 2015, Yalçın 2019).

Günlük ve aylık model kalibrasyon süreçlerinin her aşamasında, her bir parametrenin hassasiyeti, kısmen büyük ancak fiziksel olarak makul bir parametre belirsizlik aralığında, diğer tüm parametreler varsayılan değerlerinde sabit tutularak değerlendirilmiştir. Her bir parametrenin tekil hassasiyet analizi için, atanan parametre değer aralığında Latin hiperküp örnekleme yoluyla elde edilen 50 simülasyondan oluşan tek bir iterasyon

yapılmıştır. Daha sonra, bu analizlerle tanımlanan hassas parametreler ve belirlenen başlangıç değer aralıklarına göre, 500 simülasyondan oluşan birleşik bir iterasyon gerçekleştirilmiştir. Program, mevcut iterasyonda en büyük hedef fonksiyon değerini veren en iyi simülasyona ait parametre değer setine odaklanarak sonraki iterasyon için yeni parametre değer aralıkları önermektedir. Önerilen parametre değer aralıkları, SWAT yazılımı mutlak parametre değer aralıklarına ve daha önce yapılmış hassaslık analizlerine göre yeniden ayarladıktan sonra ikinci birleşik iterasyon gerçekleştirilmiştir. Birleşik iterasyonlar, elde edilen akım değerlerinde hem P faktörü ve R faktörü değerleri hem de hedef fonksiyon br^2 , NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri açısından daha fazla iyileşme sağlanamayana kadar devam ettirilmiştir. Buna göre, son iterasyon ilgili parametreler için en iyi değer aralıklarına, bu iterasyonun en yüksek hedef fonksiyon değerini veren simülasyonu ise en iyi parametre değer setine sahiptir (Abbaspour *et al.* 2007, Abbaspour *et al.* 2015).

1988-2001 periyodunda günlük ve aylık model kalibrasyonları yapıldıktan sonra, modeller, 2002-2009 periyodunda kalibre parametre değer aralıklarında 500 simülasyondan oluşan birer birleşik iterasyonla çalıştırılarak Baykan AGİ'de ölçülen tarihsel günlük ve aylık ortalama akım değerlerine karşı doğrulanmıştır. Doğrulama periyodu model performansları yine P faktörü, R faktörü, br^2 , NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri açısından değerlendirilmiştir. Doğrulama periyodu için elde edilen en iyi simülasyon sonuçları, gerçekleştirilen birleşik iterasyonda AGİ ölçüm verilerine göre en yüksek hedef fonksiyon değerini veren simülasyona aittir. Bu sonuçların, akım verileri olmaması durumunda yalnızca meteorolojik veriler kullanılarak (örneğin, iklim değişikliğinin akım rejimine etkileri analiz edilirken) yapılacak günlük ve aylık model simülasyonlarının akım tahmin performanslarını değerlendirmek için kullanılması gerçekçi olmayacaktır. Bu sebeple, günlük ve aylık modellerin AGİ verileri kullanılmadan doğrulama periyodu akım tahmin performanslarını değerlendirebilmek için (1) kalibre model en iyi simülasyon parametre değer seti

kullanılarak yapılan tek bir simülasyonla elde edilen tahminler (en iyi simülasyon tahminleri) ve (2) kalibre parametre değer aralıkları için tek bir birleşik iterasyonla elde edilen simülasyon sonuçlarının kümülatif dağılımının %2,5 ve %97,5 seviyelerinde belirlenen 95PPU bandının %50 belirsizlik seviyesi (medyan) değerleri (M95PPU) baz alınmıştır (Lemann *et al.* 2017, Yalçın 2019). Böylece, hem kalibrasyon periyodu en iyi parametre değer seti hem de kalibre parametre değer aralıklarının kullanılabilirlikleri doğrulama periyodunda ayrı ayrı değerlendirilerek günlük ve aylık modellerin akım tahmin performansları irdelenebilmiştir. Bu kapsamda iki farklı yöntemle belirlenen doğrulama periyodu günlük ve aylık akım tahminleri ile Baykan istasyonu günlük ve aylık ortalama akım değerlerinin uyumu br^2 , NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri açısından değerlendirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

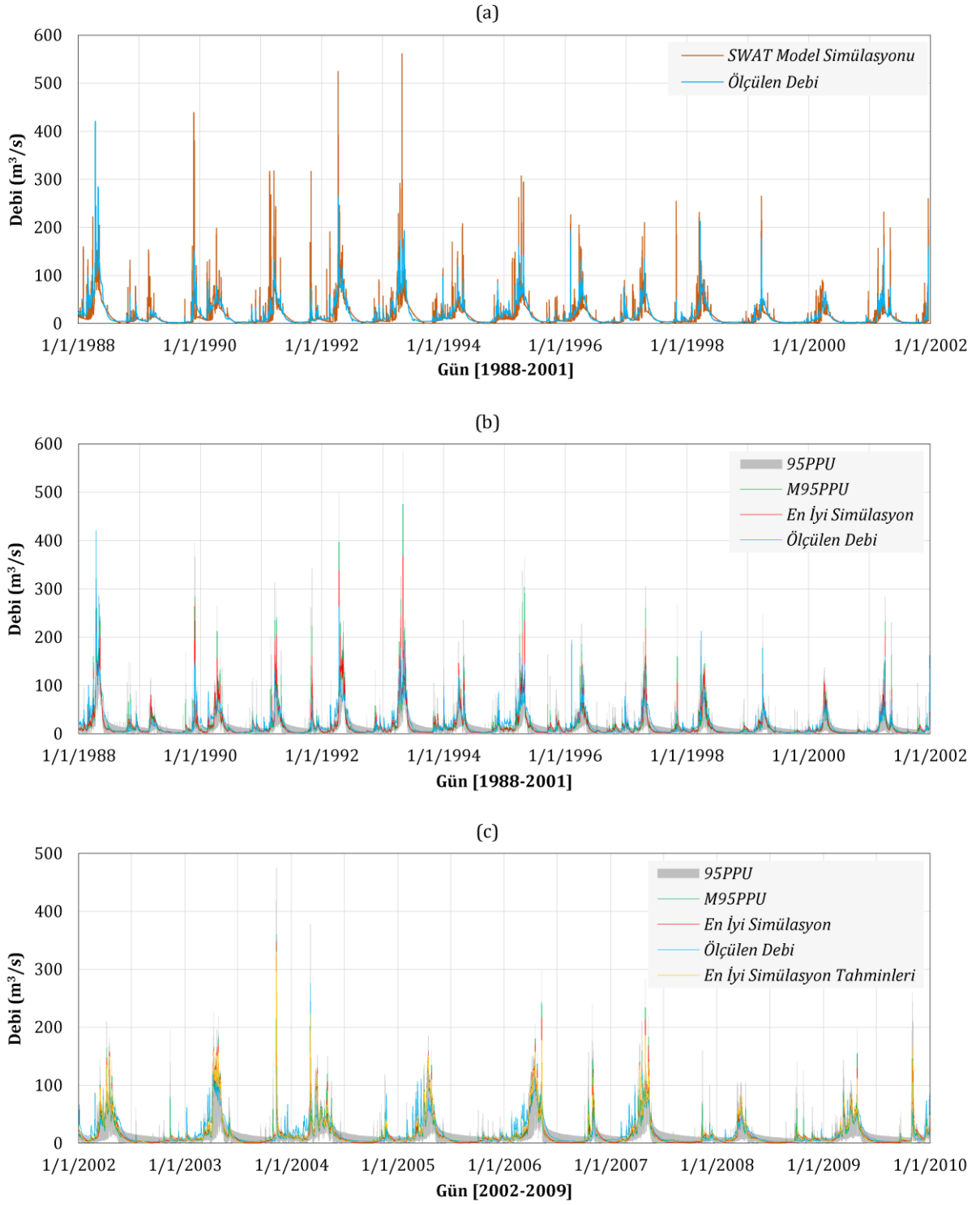
3.1. Kalibrasyon ve doğrulama sonuçları

Akım simülasyonuna yönelik model kalibrasyonu ve kalibre modelin doğrulanması için, model ölçeği ile model kurulumu ve kalibre edilmesinde kullanılan verilerin kalitesine bağlı olarak 0,7'den büyük bir P faktörü değeri ve 1,5'in altında (1 civarı) bir R faktörü değeri yeterli görülmektedir (Abbaspour 2015). Elde edilen 95PPU bandının en iyi simülasyonu bazında modelin yeterli olarak değerlendirilebilmesi için ise br^2 değerinin 0,60'tan büyük olması gerekmektedir (Santhi *et al.* 2001, Van Liew *et al.* 2007). Ayrıca, Moriasi vd. (2007), 0,75 ile 1,00 arasında bir NSE, \pm %10'dan düşük bir PBIAS ve 0,50'den küçük bir RSR değerinin, model performansının aylık zaman ölçeğinde elde edilen akım değerleri bazında oldukça iyi olduğunu söylemek için yeterli olduğunu belirtmiştir. Genel olarak, aylık akım değerleri için 0,50'den daha yüksek bir NSE, \pm %25'in altında bir PBIAS ve 0,70'ten küçük bir RSR değeri elde edildiğinde, model performansı tatmin edici olarak değerlendirilmektedir (Moriasi *et al.* 2007). Literatürde, günlük akım simülasyonları açısından model performansının söz konusu istatistikler

doğrultusunda değerlendirilebileceği genel olarak kabul görmüş bir kriter bulunmadığı ve günlük model performansının aylık model performansına göre genellikle daha düşük kaldığı göz önüne alınarak, günlük akım simülasyon istatistikleri için de aylık zaman ölçeğinde yapılan simülasyonlar için kullanılan kriterlerin kullanılması uygun görülebilir (Gassman *et al.* 2007, Shrestha *et al.* 2018, Yang *et al.* 2016).

Açık erişim veri tabanlarından elde edilen kaba ölçekli sayısal yükseklik modeli, arazi kullanım/arazi örtüsü ve toprak verileri ile çalışma havzası içerisi ve yakınlarındaki iki meteoroloji istasyonunun günlük meteorolojik gözlemleri kullanılarak oluşturulan SWAT modeli, Baykan istasyonunun 1988-2001 periyodu günlük ve aylık akımlarını sırasıyla 0,59 ve 0,84 br^2 değerleri ile simüle etmiştir. Günlük bazda gerçekleştirilen model simülasyonunun ana problemi, Şekil 3a'da görüldüğü üzere, tüm simülasyon periyodu süresince pik akım değerlerinin ölçülenlerden daha yüksek simüle edilmesidir. Ayrıca, elde edilen 0,34'lük NSE ve 0,81'lik RSR değerleri, SWAT modelinin kalibrasyon öncesinde Baykan istasyonu günlük akım değerlerini simüle etmede güvenilir bir araç olarak kullanılabilmesi için istatistiksel olarak yeterli olmadığını göstermektedir (Moriasi *et al.* 2007). Aylık bazda yapılan model simülasyonu ise her ne kadar istatistiksel olarak iyi bir performans sergilese de ana problem, Şekil 4a'da görüldüğü üzere, simülasyon süresince düşük akım değerlerinin sistematik olarak ölçülenlerden daha düşük simüle edilmesidir. Bu problemler, geliştirilen SWAT modelinin, SWAT-CUP yazılımında manuel olarak günlük ve aylık zaman ölçütlerinde ayrı ayrı üçer aşamada kalibre edilmesiyle çözülmeye çalışılmıştır.

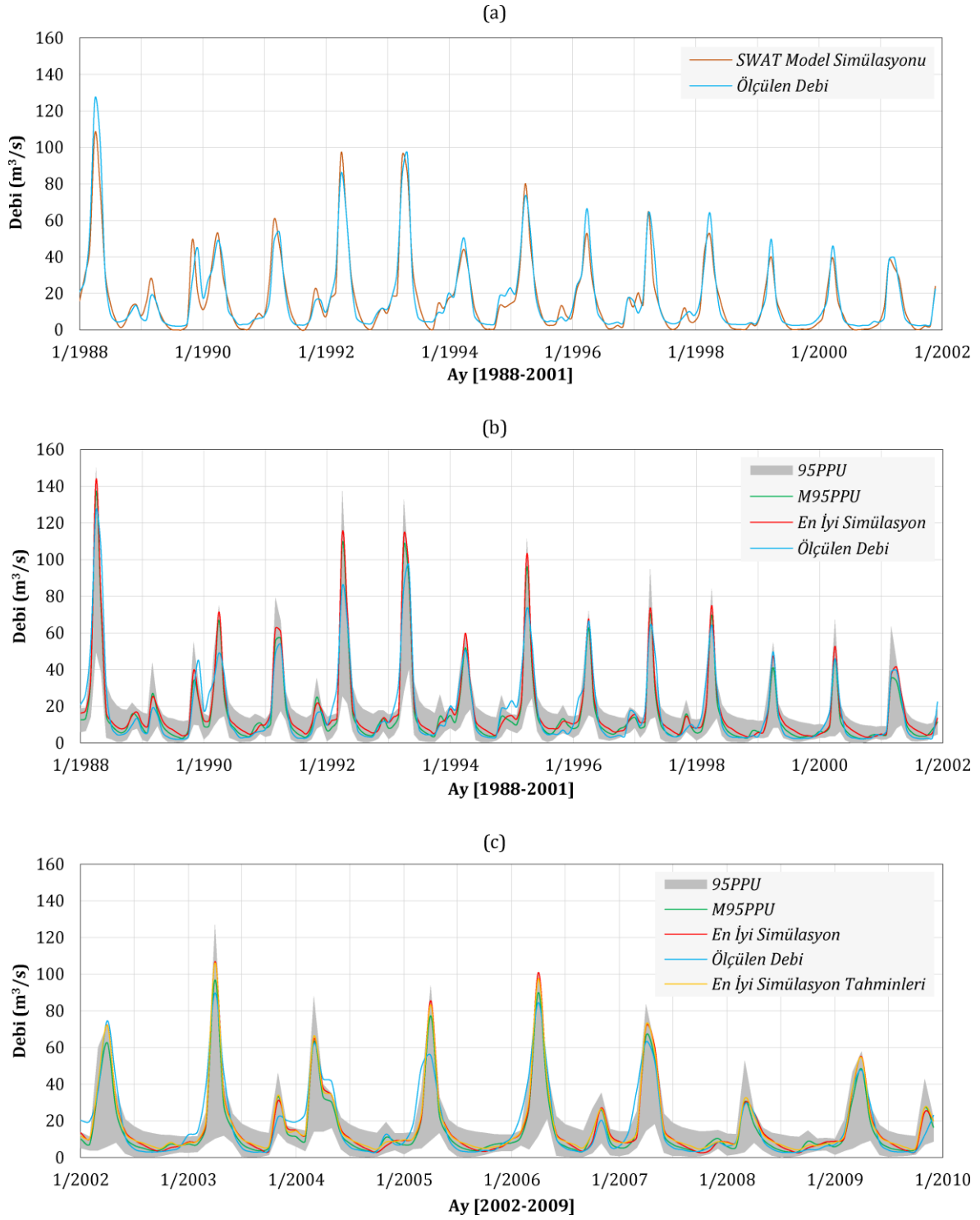
Günlük model kalibrasyon sürecinin ilk adımında, hedef fonksiyon br^2 değeri, TLAPS ve PLAPS parametrelerinin kalibre edilip sabitlenmesiyle 0,60'a yükselmiştir. Bir sonraki adımda, gerçekleştirilen tekil hassasiyet analizleri sonucunda belirlenen altı kar parametresinin en iyi simülasyon parametre değerlerine sabitlenmesi br^2 değerini 0,65'e yükseltmiştir. Bu altı parametreden



Şekil 3. Günlük model simülasyon sonuçları: (a) 1988-2001 periyodu için kalibrasyon öncesi SWAT model simülasyonu, (b) 1988-2001 periyodu için kalibre model simülasyonu ve (c) 2002-2009 periyodu için kalibre model simülasyonu.

21 Haziran'da kar için erime faktörü (mm H₂O/°C-gün) (SMFMX), kar yağış sıcaklığı (°C) (SFTMP) ve kar erimesi baz sıcaklığı (°C) (SMTMP) parametrelerinin kar yağışı, kar birikimi ve kar erime süreçlerinin zaman ve miktarını karakterize ederek günlük akım simülasyonlarını doğrudan etkileyen en hassas parametreler olduğu tespit

edilmiştir. Aylık model kalibrasyon sürecinde ise br^2 değeri ilk adımda 0,85'e, ikinci adımda 0,92'ye yükselmiştir. Aylık model kalibrasyonunun ikinci adımında yine aynı altı kar parametresi hassas olarak nitelendirilmiştir. Global hassasiyet analizi istatistiklerine göre, bu parametreler arasında aylık akım simülasyonlarına etki eden en hassas



Şekil 4. Aylık model simülasyon sonuçları: (a) 1988-2001 periyodu için kalibrasyon öncesi SWAT model simülasyonu, (b) 1988-2001 periyodu için kalibre model simülasyonu ve (c) 2002-2009 periyodu için kalibre model simülasyonu.

parametreler sırasıyla SMTMP, SMFMX, SFTMP ve kar yığını sıcaklığı gecikme faktörü (TIMP) olmuştur.

Günlük ve aylık model kalibrasyon süreçlerinin son adımında, model proje veri tabanının yeraltı suyu, toprak, hidrolojik etki birimi, yönetim ve ana kanal girdi dosyalarında yer alan hassas model

parametreleri gerçekleştirilen birleşik iterasyonlarla kalibre edilmiştir. Günlük model kalibrasyonu için gerçekleştirilen tekil hassasiyet analizleri sonucunda belirlenen 12 hassas model parametresi arasında global hassasiyet analizi sonuçlarına göre en hassas parametrelerin sırasıyla baz akım alfa faktörü (1/günler) (ALPHA_BF), yüzey akımı için

Çizelge 1. Günlük ve aylık modeller için kalibre edilen parametreler.

Günlük Model			Aylık Model		
Hassas Parametre ^{a,b,c}	Kalibre Parametre Değer Aralığı	En İyi Simülasyon Parametre Değeri	Hassas Parametre ^{a,b,c}	Kalibre Parametre Değer Aralığı	En İyi Simülasyon Parametre Değeri
Aşama I					
Sıcaklık ve yağış değişim oranlarıyla ilgili model parametrelerinin kalibrasyonu ve en iyi simülasyon değerlerine sabitlemesi					
v_TLAPS.sub	–	-7,05	v_TLAPS.sub	–	-7,05
v_PLAPS.sub	–	9,26	v_PLAPS.sub	–	9,26
Aşama II					
Karla ilgili hassas model parametrelerinin kalibrasyonu ve en iyi simülasyon değerlerine sabitlemesi					
v_SMFMX.bsn	–	3,31	v_SMTMP.bsn	–	1,23
v_SFTMP.bsn	–	1,62	v_SMFMX.bsn	–	6,6
v_SMTMP.bsn	–	-2,47	v_SFTMP.bsn	–	1,57
v_SNOCOVMX.bsn	–	38,86	v_TIMP.bsn	–	0,24
v_SMFMN.bsn	–	1,39	v_SMFMN.bsn	–	8,50
v_TIMP.bsn	–	0,75	v_SNOCOVMX.bsn	–	87,12
Aşama III					
Diğer hassas model parametrelerinin kalibrasyonu					
v_ALPHA_BF.gw	[0 – 1]	0,77	v_ALPHA_BF.gw	[0 – 0,62]	0,13
r_OV_N.hru	[-0,9 – 199]	156,82	v_CH_K2.rte	[240,7 – 500]	252,88
v_RCHRG_DP.gw	[0 – 1]	0,59	r_SOL_AWC().sol	[-0,84 – 2,86]	-0,56
v_CH_K2.rte	[-0,01 – 500]	462,5	r_SOL_K().sol	[80,71 – 244,2]	182,57
r_SOL_BD().sol	[-0,3 – 0,66]	0,06	v_GWQMN.gw	[1017 – 3673]	1349
r_SOL_K().sol	[-0,99 – 249,31]	15,28	v_GW_DELAY.gw	[53,7 – 351,3]	56,38
r_CN2.mgt	[-0,1 – 0,1]	-0,07	v_GW_REVAP.gw	[0,11 – 0,2]	0,11
v_GWQMN.gw	[0 – 5000]	4455	r_SOL_Z().sol	[-0,7 – 1,04]	0,36
v_GW_REVAP.gw	[0,02 – 0,2]	0,16	r_CN2.mgt	[-0,1 – 0,01]	-0,05
v_GW_DELAY.gw	[0 – 500]	400,5	v_RCHRG_DP.gw	[0,28 – 0,83]	0,67
r_SOL_AWC().sol	[-0,99 – 4,71]	-0,51			
r_SOL_Z().sol	[-0,7 – 2,33]	0,95			

^a Parametreler, kalibrasyon sürecinin her aşaması için en hassas olandan başlanarak listelenmiştir.

^b Parametre adlarının önündeki (v_) niteleyicisi, geçerli parametre değerinin verilen aralıktaki bir değerle değiştirilmesini ifade ederken, (r_) niteleyicisi ise geçerli parametre değerinin verilen aralıktaki bir değer 1 ile toplamıyla çarpılarak bağlı değişimini ifade eder.

^c Kalibre parametre değer aralığı belirtilmemiş parametreler, ilgili kalibrasyon aşamasında kalibre edilerek en iyi simülasyon parametre değerlerine sabitlenmiş ve kalibrasyon sürecinin devamında bu değerler kullanılmıştır.

Çizelge 2. Günlük ve aylık modeller için kalibrasyon öncesi, kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde elde edilen simülasyon istatistikleri.

Simülasyon Periyodu	Aşama	P Faktörü	R Faktörü	br ²	b	NSE	PBIAS (%)	RSR
Günlük model								
1988-2001	SWAT model simülasyonu	–	–	0,59	0,99	0,34	5,4	0,81
1988-2001	Model kalibrasyonu: <i>Aşama I</i>	–	–	0,60	0,99	0,39	4,7	0,78
	Model kalibrasyonu: <i>Aşama II</i>	–	–	0,65	1,00	0,47	3,4	0,73
	Model kalibrasyonu: <i>Aşama III</i>	0,89	0,95	0,76	1,00	0,68	4,6	0,56
2002-2009	Model doğrulaması	0,87	1,10	0,74	1,01	0,64	10,2	0,60
Aylık model								
1988-2001	SWAT model simülasyonu	–	–	0,84	0,91	0,92	5,0	0,28
1988-2001	Model kalibrasyonu: <i>Aşama I</i>	–	–	0,85	0,92	0,93	4,4	0,27
	Model kalibrasyonu: <i>Aşama II</i>	–	–	0,92	1,00	0,91	3,2	0,30
	Model kalibrasyonu: <i>Aşama III</i>	0,88	0,96	0,89	1,00	0,88	-4,6	0,35
2002-2009	Model doğrulaması	0,85	1,09	0,85	0,99	0,85	-0,8	0,39

Manning n değeri (OV_N) ve derin akifer sızma fraksiyonu (RCHRG_DP) olduğu tespit edilmiştir. Aylık model kalibrasyonu için ise değerlendirilen 10 hassas parametreden aylık akım simülasyonlarına etki eden en hassas parametre ALPHA_BF olmuştur. Kalibrasyon süreçlerine dahil edilen tüm parametrelerin listesi, kalibre parametre değer aralıkları ve en iyi simülasyon parametre değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Kalibre modellerle elde edilen günlük ve aylık simülasyon sonuçları, istasyon ölçümleriyle birlikte sırasıyla Şekil 3b ve Şekil 4b'de gösterilmiştir. Günlük model kalibre parametre değer aralıkları 0,89'luk bir P faktörü ve 0,95'lik bir R faktörü değeri sağlamış olup, kalibre parametre değer aralıklarında gerçekleştirilen en iyi simülasyon için elde edilen br^2 , NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri sırasıyla 0,76, 0,68, %4,6 ve 0,56 olmuştur. Aylık model kalibre parametre değer aralıklarıyla ise 0,88'lik bir P faktörü ve 0,96'lık bir R faktörü değeri elde edilmiş olup, en iyi simülasyon için hesaplanan br^2 , NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri sırasıyla 0,89, 0,88, %-4,6 ve 0,35'tir. Günlük ve aylık model kalibrasyon süreçleri boyunca elde edilen simülasyon istatistikleri Çizelge 2'de detaylı bir şekilde yer almaktadır.

Hem günlük hem de aylık model kalibre parametre değer aralıklarıyla, 1 civarı R faktörü değeri ile tavsiye edilen %70 değerinin oldukça üzerinde ve yaklaşık aynı oranda ölçüm değeri (P faktörü) yakalanabilmiştir (Abbaspour 2015). Kalibre modellerle hemen hemen aynı P faktörü ve R faktörü değerleri altında elde edilen en iyi simülasyon istatistikleri karşılaştırıldığında, aylık model performansının günlük modele göre daha iyi olduğu söylenebilir. Moriasi vd. (2007)'ye göre, elde edilen NSE, PBIAS ve RSR değerleri açısından kalibre model performansı günlük model için iyi, aylık model için ise çok iyi olarak tanımlanabilir. Her iki kalibrasyon süreci sonucunda da ölçülen ve simüle edilen akım değerleri arasındaki doğrusal regresyon çizgisi eğimi (b) için hedeflenen 1 civarı bir değer yakalanabilmiştir. Ayrıca, günlük ve aylık modellerin en iyi simülasyonlarında 0,60'tan büyük değerlerin kabul edilebilir görüldüğü belirleme

katsayısı (r^2) için sırasıyla 0,76 ve 0,89 gibi yüksek değerlerin elde edilebilmiş olması, kalibre model performanslarının günlük ve aylık akım değerlerini simüle etmek için oldukça yeterli olduklarını göstermektedir (Santhi *et al.* 2001, Van Liew *et al.* 2007).

Baykan AGİ'nin 1988-2001 periyodu ölçümlerine göre kalibre edilen modellerin 2002-2009 doğrulama periyodunda birer birleşik iterasyonla çalıştırılması sonucu elde edilen günlük ve aylık model çıktıları sırasıyla Şekil 3c ve Şekil 4c'de gösterilmiş olup, doğrulama periyodu için elde edilen simülasyon istatistikleri Çizelge 2'de detaylandırılmıştır. Her iki doğrulama periyodu kalibre model simülasyonunda da ölçülen ve simüle edilen akım değerleri arasında kalibrasyon periyodundakilere göre daha düşük ilişkiler elde edilmiştir. Yine de gerek 1 civarı R faktörü değerleri ile %70 oranının oldukça üzerinde ölçüm değerleri yakalanabilmesi gerekse de günlük model için iyi, aylık model için ise çok iyi olarak nitelendirilebilecek en iyi simülasyon istatistikleri elde edilebilmesi açısından kalibre model performanslarının doğrulama periyodunda da oldukça yeterli olduğu görülmektedir (Abbaspour 2015, Moriasi *et al.* 2007, Santhi *et al.* 2001, Van Liew *et al.* 2007). Bu durum, her iki kalibrasyon sürecinde de kalibre parametre değer aralıklarının kalibrasyon periyodu akım değerleri için aşırı şartlandırılmadığını ve dolayısıyla yapılan model kalibrasyonlarının başarısını göstermektedir.

3.2. Günlük ve aylık SWAT modellerinin akım tahmin performansları

Kalibre edilip doğrulanan günlük ve aylık SWAT modelleriyle akım ölçümleri olmadan sadece meteorolojik veriler kullanılarak yoğun kar yağışı ve birikimi gözlenen Baykan AGİ havzasından gelen akımların ne derece doğru tahmin edilebileceği, en iyi simülasyon tahminleri ve M95PPU değerleri baz alınarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, kalibrasyon periyodu en iyi simülasyon parametre değer setlerinin kullanılabilirliği, modellerin doğrulama periyodunda tek bir simülasyonla çalıştırılmasıyla elde edilen en iyi simülasyon

Çizelge 3. Kalibrasyon ve doğrulama periyotları için elde edilen günlük model simülasyon istatistiklerinin karşılaştırılması.

Model Tahmini	br^2	b	NSE	PBIAS (%)	RSR	\bar{x}_{model} (\bar{x} ölçülen)	σ_{model} (σ ölçülen)
Kalibrasyon periyodu (1988–2001)							
En iyi simülasyon	0,76	1,00	0,68	4,6	0,56	17,18 (18,02)	29,18 (25,54)
M95PPU	0,75	1,03	0,60	8,6	0,64	16,47 (18,02)	30,96 (25,54)
Doğrulama periyodu (2002–2009)							
En iyi simülasyon	0,74	1,01	0,64	10,2	0,60	16,08 (17,90)	26,58 (22,70)
M95PPU	0,72	1,01	0,59	11,3	0,64	15,88 (17,90)	27,06 (22,70)
En iyi simülasyon tahminleri	0,73	0,99	0,65	6,6	0,59	16,71 (17,90)	26,14 (22,70)

Çizelge 4. Kalibrasyon ve doğrulama periyotları için elde edilen aylık model simülasyon istatistiklerinin karşılaştırılması.

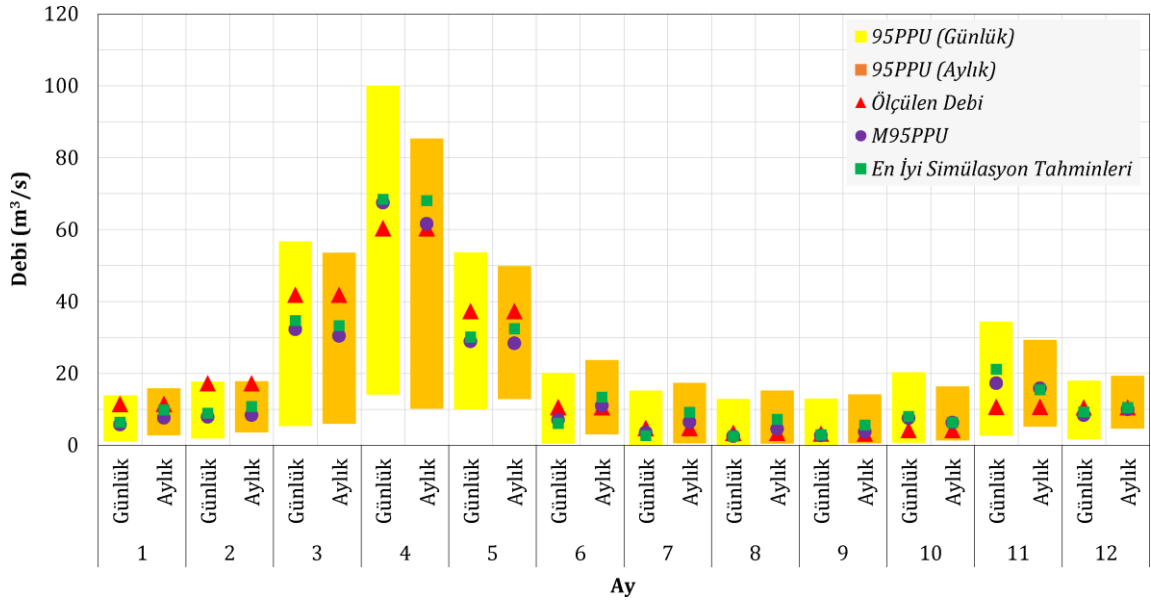
Model Tahmini	br^2	b	NSE	PBIAS (%)	RSR	\bar{x}_{model} (\bar{x} ölçülen)	σ_{model} (σ ölçülen)
Kalibrasyon periyodu (1988–2001)							
En iyi simülasyon	0,89	1,00	0,88	-4,6	0,35	18,87 (18,04)	22,88 (21,56)
M95PPU	0,84	0,95	0,88	7,1	0,35	16,76 (18,04)	21,69 (21,56)
Doğrulama periyodu (2002–2009)							
En iyi simülasyon	0,85	0,99	0,85	-0,8	0,39	18,07 (17,93)	20,71 (19,56)
M95PPU	0,77	0,89	0,85	9,9	0,39	16,15 (17,93)	18,79 (19,56)
En iyi simülasyon tahminleri	0,84	0,96	0,86	-3,1	0,38	18,48 (17,93)	20,22 (19,56)

tahminleriyle test edilmiştir. Modellerin M95PPU değerleri açısından tahmin performanslarını analiz etmek için ise modellerin hem kalibrasyon hem de doğrulama periyodunda kalibre parametre değer aralıkları için tek bir birleşik iterasyonla çalıştırılmasıyla elde edilen simülasyon sonuçlarının M95PPU değerlerine ait simülasyon istatistikleri kullanılmıştır.

Günlük model kullanılarak kalibrasyon periyodunda elde edilen M95PPU değerleri ile doğrulama periyodunda elde edilen en iyi simülasyon tahminleri ve M95PPU değerleri sırasıyla Şekil 3b ve Şekil 3c'de gösterilmiş olup, kalibrasyon ve doğrulama periyotları için hesaplanan simülasyon istatistikleri Çizelge 3'te listelenmiştir. M95PPU değerlerinin akım tahminlerinde kullanılabilirliğini kontrol etmek için kalibrasyon periyodu M95PPU değerlerinin simülasyon istatistikleri ile kalibrasyon periyodu en iyi simülasyon istatistikleri karşılaştırıldığında, M95PPU değerlerine göre model performansının hedef fonksiyon br^2 değeri açısından değişiklik göstermediği ancak Moriasi vd. (2007) tarafından NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri bazında yapılan sınıflandırmaya göre iyi seviyesinden yeterli seviyesine düştüğü

görülmüştür. Doğrulama periyodu için hesaplanan M95PPU değerleri ile en iyi simülasyon tahminleri incelendiğinde ise M95PPU değerlerine göre model performansının kalibrasyon periyodu için yapılan değerlendirmeye benzer nitelikte olduğu ancak en iyi simülasyon tahminlerine göre model performansının modelin doğrulama periyodu en iyi simülasyon performansına çok yakın olduğu ve Moriasi vd. (2007)'ye göre iyi olarak nitelendirilebileceği tespit edilmiştir.

Aylık model kullanılarak elde edilen kalibrasyon periyodu M95PPU değerleri Şekil 4b'de, doğrulama periyodu en iyi simülasyon tahminleri ile M95PPU değerleri ise Şekil 4c'de gösterilmiştir. Aylık model simülasyon istatistikleri Çizelge 4'te yer almaktadır. Kalibrasyon periyodu en iyi simülasyon istatistikleri ile kalibrasyon periyodu M95PPU değerleri için hesaplanan simülasyon istatistikleri karşılaştırıldığında, M95PPU değerlerine göre model performansının, br^2 ve PBIAS istatistikleri bazında en iyi simülasyon performansından daha düşük olmasına rağmen halen çok iyi olarak tanımlanabileceği görülmüştür (Moriasi et al. 2007). Aynı durum, doğrulama periyodu M95PPU değerleri açısından da geçerli olup, M95PPU



Şekil 5. Günlük ve aylık model simülasyonlarının doğrulama periyodu ortalama aylık akım tahminlerinin karşılaştırması.

Çizelge 5. Doğrulama periyodu için elde edilen günlük ve aylık model simülasyon istatistiklerinin aylık bazda karşılaştırılması.

Model Tahmini	br^2	b	NSE	PBIAS (%)	RSR	\bar{x}_{model} ($\bar{x}_{\text{ölçülen}}$)	σ_{model} ($\sigma_{\text{ölçülen}}$)
Günlük model (aylık ortalama)							
M95PPU	0,85	0,99	0,83	11,3	0,41	15,90 (17,93)	20,77 (19,56)
En iyi simülasyon tahminleri	0,86	1,01	0,82	6,6	0,43	16,74 (17,93)	21,33 (19,56)
Aylık model							
M95PPU	0,77	0,89	0,85	9,9	0,39	16,15 (17,93)	18,79 (19,56)
En iyi simülasyon tahminleri	0,84	0,96	0,86	-3,1	0,38	18,48 (17,93)	20,22 (19,56)

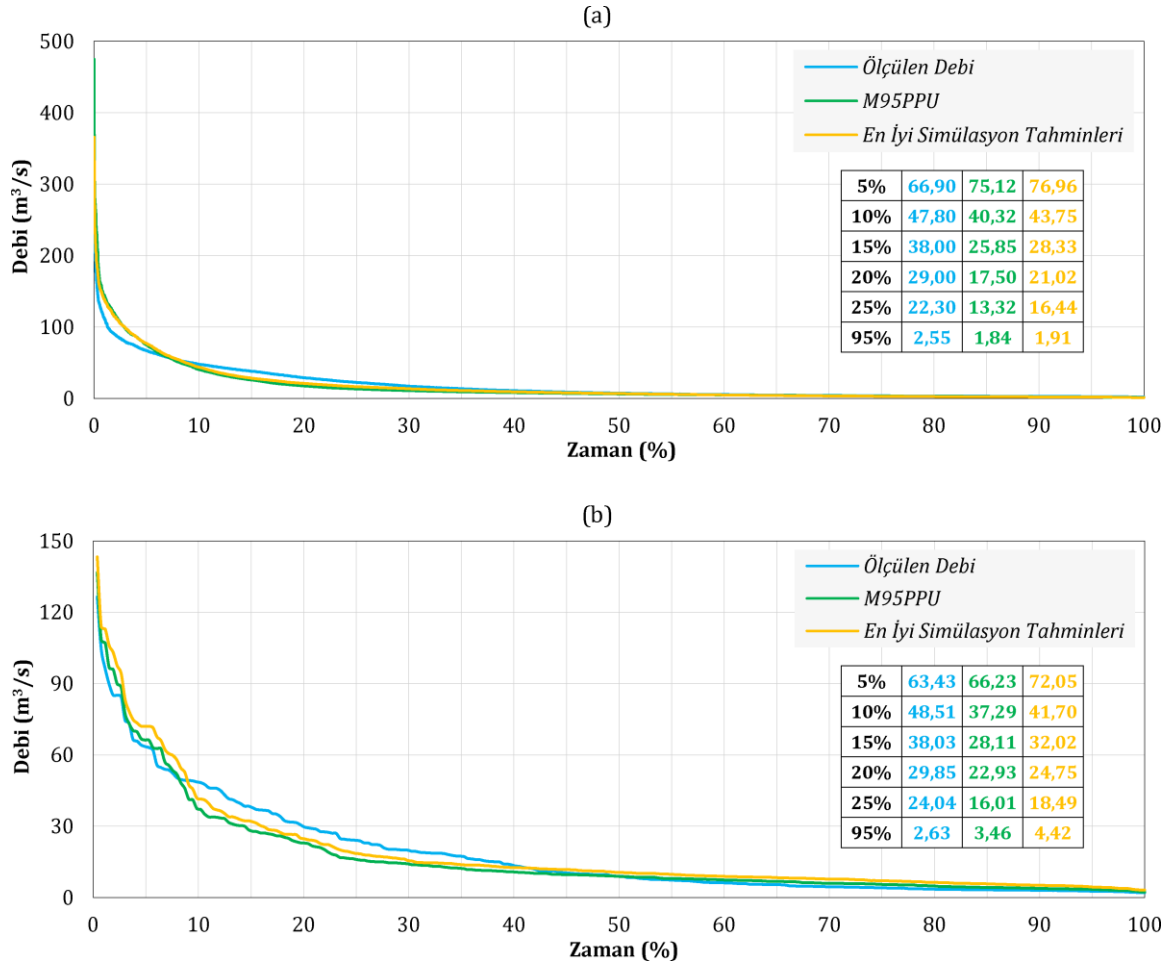
değerlerine göre model performansındaki düşüş kalibrasyon periyodundakinden çok daha belirgindir. Günlük model en iyi simülasyon tahminleri için yapılan değerlendirmeye benzer olarak, aylık modelin doğrulama periyodu en iyi simülasyon tahminleri ile doğrulama periyodu en iyi simülasyon değerleri arasında da istatistiksel olarak belirgin bir fark olmadığı tespit edilmiştir.

Aylık akım tahminleri için günlük model kullanımının tahmin performansında bir katkısının olup olmadığını incelemek amacıyla, günlük model kullanılarak doğrulama periyodu için elde edilen günlük ortalama M95PPU değerleri ve en iyi simülasyon tahminlerinin aylık ortalamaları hesaplanarak doğrulama periyodu aylık model tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, günlük ve aylık model simülasyonlarının doğrulama periyodu ortalama aylık akım tahminleri Şekil 5'te gösterilmiş olup, elde edilen simülasyon istatistikleri Çizelge 5'te listelenmiştir. Günlük

model kullanılarak elde edilen M95PPU değerleri ile en iyi simülasyon tahminlerinin aylık ortalamalarının, br^2 değerleri açısından aylık model sonuçlarına göre daha iyi olduğu görülmüş ise de değerlendirmeye alınan NSE, PBIAS ve RSR istatistikleri açısından aylık model tahminlerinin kısmen daha başarılı olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, aylık akım tahminleri için günlük model kullanımının hem M95PPU değerleri hem de en iyi simülasyon tahminleri bazında belirgin bir fark yaratmadığı söylenebilir.

3.3. Günlük ve aylık SWAT modellerinin kullanılabilirliklerinin değerlendirilmesi

Günlük ve aylık modellerin Bitlis Çayı havzasında planlanan HES'lerin kurulu güç optimizasyonları ve güvenilir enerji hesaplamalarında kullanılabilirliklerini değerlendirebilmek amacıyla, tüm analiz periyodu (1988-2009) için elde edilen M95PPU değerleri ile en iyi simülasyon

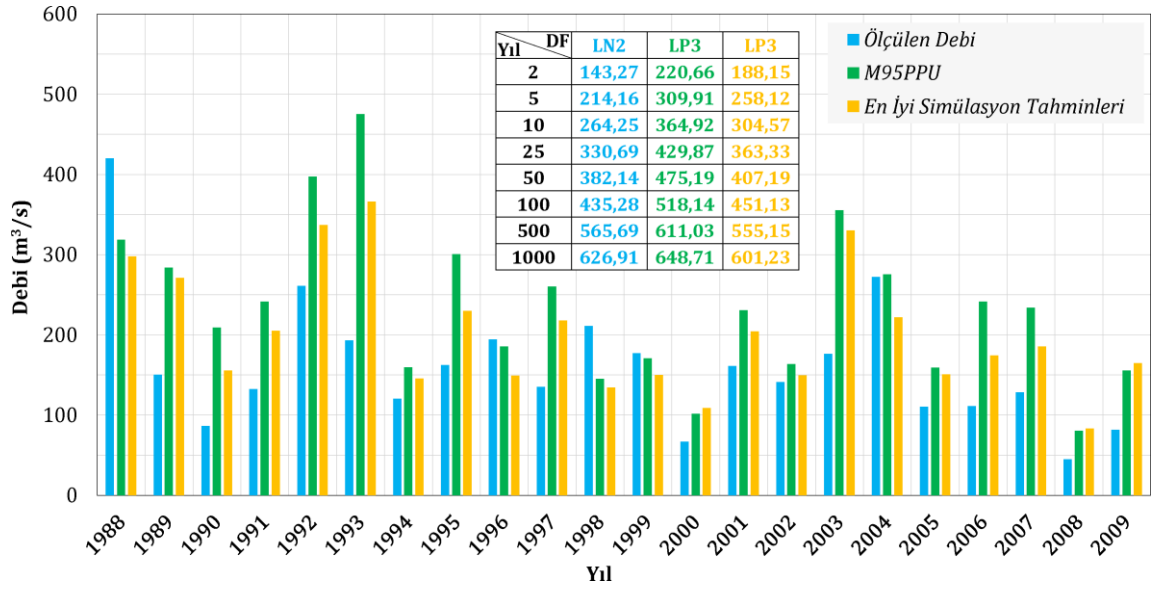


Şekil 6. 1988-2009 periyodu için günlük ve aylık model simülasyonları ile elde edilen akım tahminlerinin (a) günlük ve (b) aylık debi-süreklilik eğrilerinin karşılaştırılması.

tahminlerinin debi-süreklilik ilişkileri incelenmiştir. Günlük ve aylık model tahminleri için çizilen günlük ve aylık debi-süreklilik eğrileri sırasıyla Şekil 6a ve Şekil 6b'de gösterilmiştir. Buna göre, hem günlük hem de aylık model simülasyonları ile elde edilen akım tahminlerinin, özellikle aşılma olasılığı %30'un altında olan debilerde kısmi farklar görülse de Bitlis Çayı'nın Baykan AGİ yerindeki akım karakteristiklerini önemli bir değişime sebep olmadan yansıtabildikleri görülmektedir. Nehir tipi HES'lerin güvenilir enerji hesapları için değerlendirilen zamanın %95'inde geçen günlük ortalama akım değeri, Baykan AGİ ölçümlerine göre 2,55 m³/s iken M95PPU değerlerine göre 1,84 m³/s, en iyi simülasyon tahminlerine göre ise 1,91 m³/s olarak bulunmuştur. Nehir tipi HES'lerin kurulu güç optimizasyonları için değerlendirilen zamanın %5'i ile %25'inde geçen günlük ortalama akım değeri aralığı (AE Su 2009); Baykan AGİ ölçümlerine göre 22,30-66,90 m³/s, M95PPU değerlerine göre 13,32-75,12 m³/s ve en iyi simülasyon tahminlerine göre

16,44-76,96 m³/s olarak hesaplanmıştır. Depolamalı HES'lerin kurulu güç optimizasyonları için değerlendirilen zamanın %5'i ile %25'inde geçen aylık ortalama akım değeri aralığı (Yalçın and Tigrek 2016) ise Baykan AGİ ölçümlerine göre 24,04-63,43 m³/s, M95PPU değerlerine göre 16,01-66,23 m³/s ve en iyi simülasyon tahminlerine göre 18,49-72,05 m³/s olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, günlük model kullanılarak elde edilen günlük ortalama M95PPU değerleri ile en iyi simülasyon tahminlerinin, Bitlis Çayı havzasında planlanan HES'lerin dolusavak ve derivasyon yapılarının boyutlandırılabilmesi için uygulanabilecek noktasal ve/veya bölgesel taşkın analizlerinde kullanılabilirlikleri incelenmiştir (DSİ 2012). Bu kapsamda, doğrulama periyodunun istatistiksel olarak bir değerlendirme yapabilmek için oldukça kısa olması sebebiyle tüm analiz periyodu için elde edilen yıllık maksimum günlük akım tahminleri baz alınmış olup, bu tahminler için



Şekil 7. 1988-2009 periyodu için günlük model simülasyonu ile elde edilen yıllık maksimum günlük akım tahminleri ve bu tahminler için en uygun frekans dağılım fonksiyonlarına göre hesaplanan tekerrürlü taşkın debilerinin karşılaştırılması.

en uygun frekans dağılım fonksiyonları kullanılarak tekerrürlü taşkın debileri hesaplanmıştır (Özdemir 1978). Kolmogorov-Smirnov test sonuçlarına göre, Baykan AGİ'de ölçülen yıllık maksimum günlük ortalama akım değerlerine en uygun dağılım fonksiyonu iki parametrelili Log-Normal (LN2) iken M95PPU değerleri ve en iyi simülasyon tahminleri için en uygun dağılım fonksiyonu Log-Pearson Tip 3 (LP3) olmuştur. Bu dağılım fonksiyonları kullanılarak elde edilen 25, 50, 100 ve 1000 yıl tekerrürlü taşkın debileri ise Baykan AGİ ölçümleri için 330,69 m³/s, 382,14 m³/s, 435,28 m³/s ve 626,91 m³/s; M95PPU değerleri için 429,87 m³/s, 475,19 m³/s, 518,14 m³/s ve 648,71 m³/s; en iyi simülasyon tahminleri için 363,33 m³/s, 407,19 m³/s, 451,13 m³/s ve 601,23 m³/s'dir (Şekil 7). Baykan AGİ ölçümlerine göre hesaplanan 25 yıl ve üzeri tekerrürlü taşkın debileri ile model tahminlerine göre hesaplanan tekerrürlü taşkın debileri arasındaki yüzde hata istatistikleri M95PPU değerleri için en fazla %29,99, en iyi simülasyon tahminleri için ise en fazla %9,87'dir. Her ne kadar yıllık maksimum günlük akım değerleri açısından ölçüm değerleri ile model tahminleri arasında düşük korelasyon ilişkileri (M95PPU değerleri için r=0,55 - en iyi simülasyon tahminleri için r=0,59) elde edilmiş olsa da özellikle en iyi simülasyon tahminleriyle hesaplanan tekerrürlü taşkın debileri ile ölçüm değerlerine göre hesaplanan tekerrürlü

taşkın debilerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, küresel kapsamlı açık erişim veri tabanlarından elde edilen sayısal yükseklik modeli, arazi kullanım/arazi örtüsü ve toprak verileri ile yerel meteoroloji istasyonlarının günlük meteorolojik ölçümleri kullanılarak oluşturulan bir SWAT modelinin, yoğun kar yağışı ve birikimi gözlenen bir havzaya sahip Bitlis Çayı'nın Baykan AGİ yerindeki günlük ve aylık ortalama akım değerleri bazında simülasyon ve tahmin performansı değerlendirilmiştir. Kurulan SWAT modeli, günlük ve aylık akım simülasyonları için Baykan AGİ kayıtlarına göre ayrı ayrı kalibre edilip doğrulanmıştır. Günlük ve aylık model kalibre parametre değer aralıklarında gerçekleştirilen birleşik iterasyonlarla hem kalibrasyon hem de doğrulama periyodu için 1 civarı *R* faktörü ve tavsiye edilen %70 oranının oldukça üzerinde *P* faktörü değerlerine sahip PPU bantları oluşturulabilmiş ve günlük model için iyi, aylık model için ise çok iyi olarak nitelendirilebilecek en iyi simülasyon istatistikleri elde edilebilmiştir.

Elde edilen en iyi simülasyon istatistikleri gerçekleştirilen birleşik iterasyonlarda AGİ ölçüm verilerine göre en yüksek hedef fonksiyon değerlerini veren simülasyonlara ait olduğundan, sadece meteoroloji istasyonlarının verileri kullanılarak Baykan AGİ havzasından gelen akımların ne derece doğru tahmin edilebileceği, M95PPU değerleri ve en iyi simülasyon tahminleri baz alınarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Buna göre, M95PPU değerlerine göre günlük ve aylık modellerin akım tahmin performanslarında kısmı bir düşüş görülmekle birlikte en iyi simülasyon tahminlerine göre model performanslarında istatistiksel olarak belirgin bir fark görülmemiştir. Ayrıca, günlük model tahminlerinin aylık ortalamaları alınarak aylık model tahminleri ile karşılaştırıldığında, aylık akım tahminleri için günlük model kullanımının hem M95PPU değerleri hem de en iyi simülasyon tahminleri bazında belirgin bir fark yaratmadığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, kurulan SWAT modelinin günlük ve aylık akım simülasyonları için ayrı ayrı kalibre edilmesi ile elde edilen günlük ve aylık modeller, hem M95PPU değerleri hem de en iyi simülasyon tahminleri bazında gerek istatistiksel değerlendirme indeksleri gerekse de akım-süreklilik ilişkileri bağlamında tatmin edici tahmin performansları sunabilmişlerdir. Ancak, günlük modelin yıllık maksimum günlük akım tahminleri kullanılarak elde edilen tekerrürlü taşkın debileri her ne kadar Baykan AGİ ölçümlerine göre hesaplanan tekerrürlü taşkın debilerine yakın olsalar da günlük model yıllık maksimum akım tahminleri ile istasyon ölçümleri arasında güçlü bir korelasyon elde edilememiştir. Bu durum; hidro-meteorolojik ölçüm kalitesi, teorik model, model parametreleri gibi yönetimi zor belirsizlik kaynakları sebepli olabileceği gibi, günlük akım simülasyonları için model kurulduğunda daha fazla detay içeren büyük ölçekli mekansal veri setlerinin kullanımı denenebilir.

Geliştirilen modellerle hem akım-süreklilik ilişkileri hem de tekerrürlü taşkın debileri bağlamında ölçüm değerleriyle uyumlu tahmin performansları elde edilebilmiş olması, bu modellerin, gelecek on

yıllarda Bitlis Çayı'nın akım rejiminde meydana gelebilecek olası değişimlerin günlük ve aylık bazda incelenebilmesine olanak sağlayabileceğini göstermektedir. Geliştirilen modeller, iklim değişikliği senaryoları için üretilen küresel ölçekli iklim projeksiyonlarının bölgesel ölçeğe indirgenmesiyle elde edilebilecek yağış ve sıcaklık verileriyle çalıştırılabilir. Bu kapsamda elde edilebilecek akım tahminlerinin, havza HES projelerinin planlama ve işletme politikalarının yeniden değerlendirilerek havza su potansiyelinin daha verimli kullanılmasına destek olabileceği düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- Abbas, T., Hussain, F., Nabi, G., Boota, M.W. and Wu, R.-S., 2019. Uncertainty evaluation of SWAT model for snowmelt runoff in a Himalayan watershed. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **30(2)**, 265-279.
- Abbaspour, K.C., 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Eawag - Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, 100.
- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A. and van Genuchten, M.Th., 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, **3(4)**, 1340-1352.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Kløve, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, **524**, 733-752.
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, **333(2-4)**, 413-430.
- Adam, J.C., Hamlet, A.F. and Lettenmaier, D.P., 2009. Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrological Processes*, **23(7)**, 962-972.
- AE Su (AE Su Mühendislik Limited Şirketi), 2009. Başören Regülatörü ve HES Fizibilite Raporu. AE Su Mühendislik Limited Şirketi, Ankara, 161.

- Ahl, R.S., Woods, S.W. and Zuuring, H.R., 2008. Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, **44(6)**, 1411-1430.
- Al-Khafaji, M.S. and Saeed, F.H., 2018. Effect of DEM and land cover resolutions on simulated runoff of Adhaim Watershed by SWAT model. *Engineering and Technology Journal (Part A: Engineering)*, **36(4)**, 439-448.
- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B. and Neitsch, S.L., 2013. Soil & Water Assessment Tool Input/output Documentation (Version 2012). Texas Water Resources Institute, Texas, 650.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Liew, M.W.V., Kannan, N. and Jha, M.K., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, **55(4)**, 1491-1508.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment - Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, **34(1)**, 73-89.
- Aydin, M.C. and İşhik, E., 2015. Evaluation of ground snow loads in the micro-climate regions. *Russian Meteorology and Hydrology*, **40(11)**, 741-748.
- Aydın, M.C. ve Yaylak M.M., 2016. Bitlis Çayı taşkın hidrolojisi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **5(1)**, 49-58.
- Bozkurt, D. and Sen, O.L., 2013. Climate change impacts in the Euphrates-Tigris Basin based on different model and scenario simulations. *Journal of Hydrology*, **480**, 149-161.
- Daggupati, P., Srinivasan, R., Ahmadi, M. and Verma, D., 2017. Spatial and temporal patterns of precipitation and stream flow variations in Tigris-Euphrates river basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, **189(2)**, 50.
- Douglas-Mankin, K.R., Srinivasan, R. and Arnold, J.G., 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, **53(5)**, 1423-1431.
- DSİ (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü), 2012. Taşkınlar Hidrolojisi Tasarım Rehberi. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 56.
- EİE (Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü), 1990. Bitlis Çayı İstikşaf Raporu. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara, 110.
- Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G. and Hotchkiss, R.H., 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the Soil Water Assessment Tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, **262(1-4)**, 209-223.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, **50(4)**, 1211-1250.
- Gassman, P.W., Sadeghi, A.M. and Srinivasan, R., 2014. Applications of the SWAT model special section: Overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, **43(1)**, 1-8.
- Geza, M. and McCray, J.E., 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, **88(3)**, 393-406.
- Glavan, M. and Pintar, M., 2012. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats of Catchment Modelling with Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model. ss 39-64. Nayak, P., ed. Water Resources Management and Modeling. InTech, Rijeka, 310.
- Grusson, Y., Sun, X., Gascoin, S., Sauvage, S., Raghavan, S., Ancil, F. and Sánchez-Pérez, J.-M., 2015. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology*, **531(3)**, 574-588.
- Himanshu, S.K., Garg, N., Rautela, S., Anuja, K.M. and Tiwari, M., 2013. Remote sensing and GIS applications in determination of geomorphological parameters and design flood for a Himalayan river basin, India. *International Research Journal of Earth Sciences*, **1(3)**, 11-15.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., ed. Cambridge University Press, New York, 1535.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects - Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel

- on Climate Change. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L., ed. Cambridge University Press, New York, 1132.
- Katz, R.W. and Brown, B.G., 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, **21(3)**, 289-302.
- Lemann, T., Roth, V. and Zeleke, G., 2017. Impact of precipitation and temperature changes on hydrological responses of small-scale catchments in the Ethiopian Highlands. *Hydrological Sciences Journal*, **62(2)**, 270-282.
- Liu, Y., Cui, G. and Li, H., 2020. Optimization and application of snow melting modules in SWAT model for the alpine regions of northern China. *Water*, **12(3)**, 636.
- Luo, Y., Arnold, J., Allen, P. and Chen, X., 2012. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, **16(4)**, 1259-1267.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018a. 17207-Bitlis Meteoroloji İstasyonu Uzun Yıllar Tüm Parametreler Bülteni (1959-2009). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018b. 17210-Siirt Meteoroloji İstasyonu Uzun Yıllar Tüm Parametreler Bülteni (1939-2017). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018c. 17207-Bitlis Meteoroloji İstasyonu Günlük Toplam Yağış, Maksimum ve Minimum Sıcaklık, Ortalama Nispi Nem, Ortalama Rüzgar Hızı ve Toplam Güneşlenme Şiddeti Ölçümleri (1959-2009). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018d. 17210-Siirt Meteoroloji İstasyonu Günlük Toplam Yağış, Maksimum ve Minimum Sıcaklık, Ortalama Nispi Nem, Ortalama Rüzgar Hızı ve Toplam Güneşlenme Şiddeti Ölçümleri (1939-2017). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018e. 17207-Bitlis Meteoroloji İstasyonu Yıllık Standart Zamanlarda Gözlenen En Büyük Yağış Değerleri (1966-2009). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018f. 17210-Siirt Meteoroloji İstasyonu Yıllık Standart Zamanlarda Gözlenen En Büyük Yağış Değerleri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (1959-2015), Ankara.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, **50(3)**, 885-900.
- Omani, N., Srinivasan, R., Karthikeyan, R. and Smith, P.K., 2017. Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia). *Water*, **9(2)**, 111.
- Özdemir, H., 1978. Uygulamalı Taşkın Hidrolojisi. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 221.
- Pandey, A., Himanshu, S.K., Mishra, S.K. and Singh, V.P., 2016. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *CATENA*, **147**, 595-620.
- Pradhanang, S.M., Anandhi, A., Mukundan, R., Zion, M.S., Pierson, D.C., Schneiderman, E.M., Matonse, A. and Frei, A., 2011. Application of SWAT model to assess snowpack development and streamflow in the Cannonsville watershed, New York, USA. *Hydrological Processes*, **25(21)**, 3268-3277.
- Rahaman, M.M., Lamichhane, G.R., Shrestha, A., Thakur, B., Kalra, A. and Ahmad, S., 2019. Using SWAT to simulate streamflow in Trinity River Basin, Texas, USA. World Environmental and Water Resources Congress 2019: Watershed Management, Irrigation and Drainage, and Water Resources Planning and Management, 19-23 Mayıs, Pittsburgh, 421-435.
- Rahman, K., Maringanti, C., Beniston, M., Widmer, F., Abbaspour, K. and Lehmann, A., 2013. Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: The Upper Rhone River watershed case in Switzerland. *Water Resources Management*, **27(2)**, 323-339.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, **37(5)**, 1169-1188.
- Sharifi, A. and Kalin, L., 2010. Effect of land use uncertainty on watershed modeling. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change, 16-20 Mayıs, Providence, 4730-4739.
- Shrestha, S., Shrestha, M. and Shrestha, P.K., 2018. Evaluation of the SWAT model performance for simulating river discharge in the Himalayan and

- tropical basins of Asia. *Hydrology Research*, **49(3)**, 846-860.
- Singh, V.P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, 1144.
- Stratton, B.T., Sridhar, V., Gribb, M.M., McNamara, J.P. and Narasimhan, B., 2009. Modeling the spatially varying water balance processes in a semiarid mountainous watershed of Idaho. *Journal of the American Water Resources Association*, **45(6)**, 1390-1408.
- Tan, M.L., Ramli, H.P. and Tam, T.H., 2018. Effect of DEM resolution, source, resampling technique and area threshold on SWAT outputs. *Water Resources Management*, **32(14)**, 4591-4606.
- Troin, M. and Caya, D., 2014. Evaluating the SWAT's snow hydrology over a Northern Quebec watershed. *Hydrological Processes*, **28(4)**, 1858-1873.
- Van Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D. and Arnold, J.G., 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, **12(2)**, 173-189.
- Yalçın, E. and Tigrek, S., 2016. Hydropower production without sacrificing environment: A case study of Ilisu Dam and Hasankeyf. *International Journal of Water Resources Development*, **32(2)**, 247-266.
- Yalçın, E., 2019. Estimation of irrigation return flow on monthly time resolution using SWAT model under limited data availability. *Hydrological Sciences Journal*, **64(13)**, 1588-1604.
- Yang, X., Liu, Q., He, Y., Luo, X. and Zhang, X., 2016. Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **30(3)**, 959-972.
- Yolsu (Yolsu Mühendislik Hizmetleri Limited Şirketi), 2009. Başören HES Fizibilite Raporu. Yolsu Mühendislik Hizmetleri Limited Şirketi, Ankara, 162.
- 3- <https://earthexplorer.usgs.gov/>, (20.08.2019)
- 4- <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>, (20.08.2019)
- 5- <http://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>, (20.08.2019)
- 6- <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>, (20.08.2019)
- 7- <https://swat.tamu.edu/software/links/>, (25.08.2019)

İnternet Kaynakları

- 1- <http://www.dsi.gov.tr/faaliyetler/hessu-kullanim-anlasmalari>, (28.01.2020)
- 2- <http://www.dsi.gov.tr/faaliyetler/akim-gozlem-yilliklari>, (19.08.2019)

Eş Kanallı Açısal Pres (EKAP) Yöntemi ile Şekillendirilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri ve Makroskobik Deformasyon Davranışı Arasındaki İlişki

Çağatay ELİBOL¹

¹Türk-Alman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Teknolojileri Bölümü, Beykoz/İstanbul

e-posta: elibol@tau.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3595-5259>

Geliş Tarihi: 05.05.2020

Kabul Tarihi: 25.08.2020

Öz

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının kaba taneli ve eşit kanallı açısal presleme (EKAP) ile üretilen ultra ince taneli durumda, quasi-statik tek eksenli çekme yüklemesi altında (yaklaşık $10^{-3} s^{-1}$ deformasyon hızı ile) sergilediği mekanik davranış ve makroskobik deformasyon modu (homojen vs. lokalize) karakterize edilmiştir. EKAP işleminin ve farklı kanal iç açılarının çekme dayanımı, kopma uzaması (süneklik), üniform uzama ve sertlik gibi malzemenin mekanik özelliklerine etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Dijital görüntü korelasyon (DIC) tekniği ile tüm çekme testleri esnasında yüzey deformasyon alanları in-situ olarak ölçülmüştür. Çift paso EKAP işlemi sonrası malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertliğinin sırasıyla 795,8 MPa, 660 MPa ve 255 HV'den, 120° kanal iç açılı kalıpla EKAPlanmış numunede 918,3 MPa, 850 MPa, 303 HV ve 90° kanal iç açılı kalıpla EKAPlanmış numunede ise 990,5 MPa, 890 MPa, 343 HV değerlerine ulaştığı görülmüştür. Ancak, tanelerin EKAP prosesi neticesinde incelenmesi, malzemenin müteakip kırılmasını tetikleyebilecek olan erken zamanlı deformasyon lokalizasyonuna bağlı olarak üniform uzama ve kopma uzamasında önemli bir gerilemeyi beraberinde getirmektedir. DIC verileri, başlangıç numunesinde (EKAP öncesi) deformasyonun homojen olarak ilerlediğini; çift paso EKAP işlemi sonrası çekme yüklemesine tabi tutulan numunede ise deformasyonun daha ziyade inhomojen/lokalize bir mod eğilimi sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, EKAP sonrası plastik deformasyona tabi tutulan malzemenin makroskobik deformasyon modu ile sünekliği arasındaki ilişkiye dair yeni bakış açıları kazandırmaktadır.

Anahtar kelimeler

Titanium Alaşımları;

Ti-6Al-4V;

EKAP;

Aşırı Plastik

Deformasyon;

Dijital Görüntü

Korelasyonu (DIC)

Relationship between Mechanical Behavior and Macroscopic Deformation Mode of Ti-6Al-4V Alloy Processed by ECAP

Abstract

In this study, the mechanical behavior and the macroscopic deformation mode with respect to localized vs. homogenous deformation under quasi-static uniaxial tensile loading (at the strain rate of about $10^{-3} s^{-1}$) of Ti-6Al-4V alloy in the as-received (coarse-grained) and the ultrafine-grained (UFG) state produced by equal-channel angular pressing (ECAP) are characterized. The effect of ECAP process and different intersecting channel angles on the mechanical properties such as the tensile strength, the ultimate strain (ductility), the uniform elongation and the hardness is studied extensively. Digital image correlation (DIC) is used to document the surface strain fields in situ during all the tensile tests. It is shown that the tensile strength, the yield strength and the hardness of the material increased from 795,8 MPa, 660 MPa and 255 HV to 918,3 MPa, 850 MPa, 303 HV and 990,5 MPa, 890 MPa, 343 HV by applying two passes of ECAP using a mold with an intersecting channel angle of 120° and 90°, respectively. However, a refinement of the grains by ECAP leads to a significant decrease in the uniform elongation and ultimate strain due to the early stage strain localization, which may provide the nuclei for subsequent fracture of the material. DIC-images clearly indicate that in the as-received state, the deformation proceeds homogeneously, whereas after two passes of ECAP, the deformation tends to an inhomogeneous/localized macroscopic mode. The results presented in this work provide new insights into the relationship between the macroscopic deformation mode and the ductility of the ECAPed material.

Keywords

Titanium Alloys;

Ti-6Al-4V;

ECAP;

Severe Plastic

Deformation (SPD);

Digital Image

Correlation (DIC)

1. Giriş

Çok kristalli bir malzemede tane boyutu, malzemenin sertliğinin, mukavemetinin ve iletkenliğinin yani malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çok etkin bir rol oynamaktadır (Langdon 2013). Bu nedenle, tane boyutu kontrolü, istenen özelliklerde malzeme tasarımı için önemli bir parametre olmuştur. Geçmişten günümüze, üstün mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerin elde edilmesinde çok ince taneli / ortalama tane boyutu $1 \mu\text{m}$ 'nin altındaki (*ultrafine-grained, UFG*) ve özellikle nano yapıları / ortalama tane boyutu 100 nm 'nin altındaki (*nano-crystalline*) malzemeler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Senkov et al. 2004). Dislokasyonların hareketini kısıtlayan, tane sınırlarının malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi ilk olarak 1950'li yıllarda, birbirlerinden bağımsız olarak E.O. Hall ve N.J. Petch tarafından ortaya konulmuştur ve bu nedenle bu etki *Hall-Petch ilişkisi* ile literatürde ifade edilmektedir:

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

σ malzemenin akma dayanımını, σ_0 kristalin dislokasyon hareketine gösterdiği direnci (ya da engelsiz dislokasyon hareketi için gerekli ilk gerilimi), k malzemeye özgü mukavemet sabitini ve d ortalama tane boyutunu ifade etmektedir (Hall 1951, Petch 1953). Bu ilişki doğrultusunda, genel olarak tane boyutu küçüldükçe, malzemenin akma dayanımının arttığı görülmektedir.

Çok ince taneli (UFG) malzeme üretimi, genel itibarıyla aşağıdan-yukarıya (*bottom-up*) ve yukarıdan-aşağıya (*top-down*) yaklaşımları olmak üzere iki farklı yol ile gerçekleştirilebilmektedir (Zhu et al. 2004). Bottom-up yönteminde, genellikle nano-tozlar yoğunlaştırılarak, konsolide edilirken (Gleiter 2000); top-down yaklaşımın temelinde ise kütleli halde kaba taneli malzemeye uygulanan aşırı plastik deformasyon (*severe plastic deformation, SPD*) neticesinde çok ince taneli yapıya ulaşma yatmaktadır (Khereddine et al. 2013, Han et al. 2016). Geliştirilmiş pek çok SPD tekniği olmakla beraber; eş kanallı açılma pres/EKAP (equal-channel angular pressing, ECAP) ve yüksek basınç altında burma (high pressure torsion, HPT) en

yaygın olarak uygulanan yöntemlerdir (Smirnova et al. 1986, Segal 1977, Segal et al. 1981, Gleiter 1989, Senkov et al. 2004, Valiev and Langdon 2006). Bu çalışmada kullanılan ve V.M. Segal (Segal 1977) tarafından geliştirilmiş olan EKAP yöntemi sayesinde haddeleme, tel çekme, ekstrüzyon, dövme gibi geleneksel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan çok ince taneli ve homojen malzemeler üretilebilmektedir. Bunun yanı sıra, nispeten büyük boyuttaki malzemelerin şekillendirilmesinde kolaylıkla kullanılabilen ve birçok metal ile alaşıma uygulanabilmektedir. Malzemenin ince taneli olmasıyla birlikte iletkenlik, sertlik, termal genleşme, düşük sıcaklıklarda süper plastiklik, kırılma tokluğu ve mukavemet gibi özelliklerinin de istenilen seviyelerde olması sağlanmaktadır (Valiev et al. 2000, Segal et al. 2004, Iwahashi et al. 1996). Bu sebeplerden ötürü, birçok alışımda çökelti homojenliğini sağlamak ve daha ince taneye sahip parçalar üretmek amacıyla EKAP yöntemi tercih edilmektedir.

Günümüzde, titanyum alaşımlarının uygulama alanları çok geniş olmakla birlikte; özellikle %6 Alüminyum, %4 Vanadyum ve %90 Titanyum içeren Titanyum Grade 5 (Ti-6Al-4V) alaşımı oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımı tipik iki fazlı yapıya (α -HSP ve β -HMK) sahip olmakla beraber; yüksek mukavemeti, hafifliği ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik dayanımı ile havacılık-uzay ve nükleer endüstrisinde (Boyer 1995, Leyens and Peters 2002, Moiseyev 2006, Yu et al. 2018); yüksek korozyon direnci ve yüksek biyouyumluluk özellikleri ile de özellikle biyomedikal uygulamalarda tercih edilmektedir (Hussein and Fekry 2019, Barao et al. 2012, Phume et al. 2018, Popoola et al. 2016, Zherebtsov et al. 2016, Motyka et al. 2014, Liu et al. 2018). Ti-6Al-4V alaşımında çok ince taneli yapının oluşumuyla mukavemet, yorulma dayanımı ve superplastiklik gibi özelliklerin önemli bir seviyede iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir (Semenova et al. 2017, Estrin and Vinogradov 2013, Valiev et al. 2016). Mukavemet artışı ile beraber metal ve alaşımların sünekliliğine bağlı özelliklerinde (kopma uzaması, kırılma tokluğu gibi) azalma eğilimi gösterdiği bilinmektedir (Pippan and Hohenwarter 2016). Bu tipik ilişki, Ti-6Al-4V

alaşımının da ileri mühendislik uygulamalarında kullanımı açısından sorun teşkil etmektedir. Semenova ve arkadaşları, çok ince taneli Ti-6Al-4V alaşımını EKAP işlemine tabii tutarak, malzemenin mekanik davranışını ve darbe dayanımı üzerine çentik etkisini araştırmışlardır. Darbe dayanımının, malzemenin gerinim sertleşmesi kapasitesinin artırılmasına yönelik, aynı zamanda malzemenin sünekliliğini iyileştirici bir yaklaşım ile artırılabilirliğini göstermişlerdir (Semenova et al. 2017). Evstifeev ve Valiev ise, Ti Grade 4 alaşımında EKAP aşırı plastik deformasyon işleminin malzemenin statik ve dinamik mekanik davranışına etkisini incelemişlerdir (Evstifeev and Valiev 2019). Zhao ve arkadaşları da, çoklu paso EKAP metodu ile üretilmiş çok ince taneli Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonunu detaylı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir (Zhao et al. 2020).

Bu çalışmada; Ti-6Al-4V alaşımı başarılı bir şekilde EKAP yöntemi ile **aşırı plastik deformasyona** maruz bırakılmıştır. EKAP prosesinin ve farklı kanal açılarının malzemenin mekanik özelliklerine (çekme dayanımı, kopma uzaması/süneklilik, sertlik) etkisi analiz edilmiştir. Bunun yanı sıra, malzemenin makroskobik deformasyon davranışı dijital görüntü korelasyon tekniği (*digital image correlation, DIC*) ile lokal yüzey gerinim alanları in-situ ve optik olarak ölçülmek suretiyle karakterize edilmiştir. Böylelikle, bu çalışmanın ana amacını oluşturan, Ti-6Al-4V alaşımında EKAP prosesi neticesinde meydana gelen tane küçülmesi ile alaşımın mekanik davranışı (mukavemet ve süneklilik açısından) ve makroskobik deformasyon modu arasındaki ilişki irdelenmiştir.

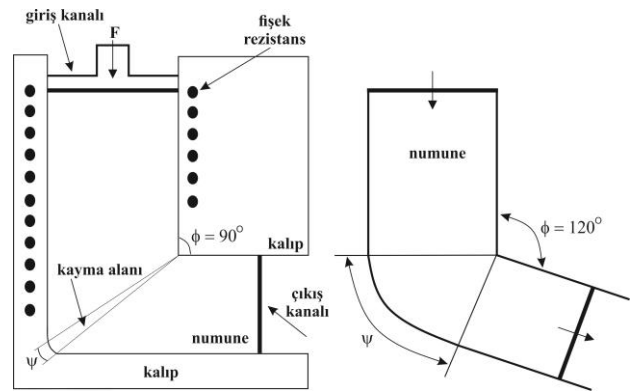
2. Materyal ve Metot

2.1 Ti-6Al-4V Alaşımı

EKAP işlemine tabii tutulan Ti-6Al-4V alaşımı (kimyasal kompozisyon: %6,43 Al, %4,01 V, %0,002 N, %0,002 H, %0,166 O₂, %0,16 Fe, %0,005 C) *Edelstahlzieherei Mark GmbH* firmasından, ekstrüzyon sonrası oluşan iç gerilmelerin giderilmesi adına 700°C'de tavlanmış halde temin edilmiştir.

2.2 EKAP Prosesi

EKAP, L-şeklindeki eş kesitli iki kanaldan kütleli (bulk) malzemenin geçirilerek, arakesit boyunca kayma deformasyonunun oluşturduğu metal akış prosesi ile malzemenin iç yapısında aşırı plastik deformasyon oluşumu neticesinde tane boyutu inceltilmesi prosesidir (Iwahashi et al. 1998). Bu çalışmada kullanılan EKAP kalıpları ve işlem prensibi Şekil 1'de gösterilmektedir. İşlem görecektir numune/parça öncelikli olarak dikey kanala yerleştirilir ve itici vasıtasıyla yatay kanala doğru itilir. Bu esnada iki kanal arakesitinden geçişi sırasında malzemeye kayma kuvvetleri etki eder; malzeme aşırı plastik deformasyona uğratılırken, giriş ve çıkış kanallarının kesit alanlarının eşit olması nedeniyle numunenin ölçülerinde bir değişiklik olmaksızın kanal içerisinde açılmal kırılma meydana getirilerek tane yapısı inceltilmektedir.



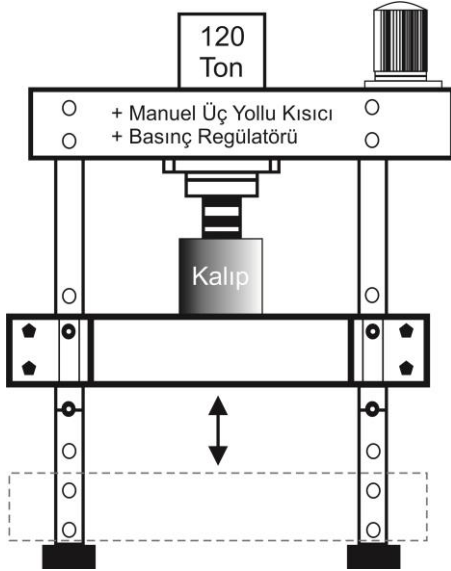
Şekil 1. 90° ve 120° kanal iç açısına (Φ) sahip EKAP kalıpları.

İç açısı (Φ) ve kanal dış köşe eğrilik açısı (Ψ), eş kesitli yatay ve dikey kanal arasındaki açıdır. Kalıp (dolayısıyla kayma alanı) geometrisi ve uygulanan EKAP paso sayısı (N), malzeme içerisinde meydana gelen toplam efektif deformasyon (birim şekil değiştirme) miktarını belirlemektedir (Iwahashi et al. 1996, Stüwe 2003):

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

EKAP işlemleri, Şekil 2'de şematik çizimi verilen 4 KW motor gücüne sahip 120 ton kapasiteli hidrolik prese (Hidrolik Halim Usta HD120 Atölye Tipi Pres) entegre edilmiş ve sıcak iş takım çelğinden imal edilmiş EKAP kalıbından oluşan düzenekte gerçekleştirilmiştir. Düzeneğe pres hızı ayarı için manuel üç yollu kısıcı ve basınç regülatörü

eklenmiştir. Literatürde, genellikle çalışılan iki kanal arasındaki iç açı (Φ) 90° ve 135° arasında verilmektedir (Nakashima et al. 1998). Bu çalışmada, iki tip kanal iç açısı kullanılmış olup, 90° ($\Psi=0^\circ$) ve 120° ($\Psi=10^\circ$) şeklindedir. 600°C ve 700°C gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen EKAP işleminin, numune boyunca nispeten homojen deformasyona neden olduğu önceki çalışmalarda açıkça ortaya konulmuştur (Zhao et al. 2020). $15 \times 15 \times 130 \text{ mm}^3$ ölçülerine sahip, ısıl işlem fırınında 575°C sıcaklıkta 5 dakika süresince ön ısıtılmış numuneler 90° ve 120° kanal iç açısına sahip kalıplar kullanılarak çift pasolu EKAP işlemine tabi tutulmuştur. EKAP rotası uygulanmıştır (Barber et al. 2004, Iwahashi and Furukawa et al. 1998): Numune ilk pasoyu takiben, boylamasına eksenine doğrultusunda saat yönünde 90° döndürüldükten sonra ikinci EKAP pasosu uygulanmıştır. Kalıp içerisine yerleştirilmiş fişek rezistanslar vasıtasıyla EKAP kalıbı da işlem esnasında yaklaşık 575°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Pres hızı 20 mm/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Numune ve EKAP düzeneği parçaları arasındaki sürtünmeyi azaltmak adına MoS_2 ve grafit içeren yağlayıcılar kullanılmıştır.

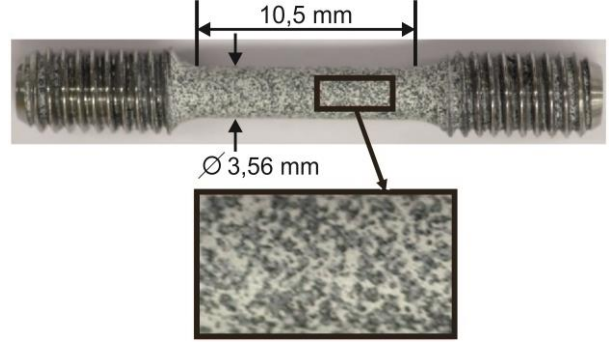


Şekil 2. Kullanılan EKAP düzeneği şematik çizimi.

2.3 Mekanik Analizler

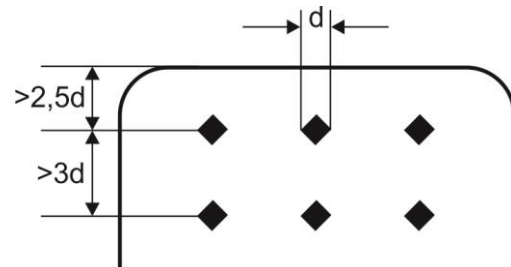
Tek eksenli, quasi-statik çekme deneyleri "Zwick Allround-Line 20 kN" üniversal çekme/basma test cihazında pozisyon kontrolü altında ve 10^{-3} s^{-1} deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Mekanik deneylerde, serbest uzunluğu $10,5 \text{ mm}$ ve çapı $3,56 \text{ mm}$ olan "dog-bone" (köpek kemiği benzeri)

şeklindeki numuneler kullanılmıştır (Şekil 3). Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm çekme testlerinde, deformasyon/uzama ölçümü için konvansiyonel clip-on ekstansometre kullanılmamış olup; yüzey yer değiştirme ve gerinimler DIC yöntemi ile optik olarak, temassız bir şekilde ölçülerek mühendislik gerilim-gerinim eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 3. Silindirik, dog-bone şeklindeki çekme test numunesine ait geometri ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) ile yüzey deformasyon alanlarının ölçümü için gerekli, numune yüzeyinde yapay olarak rastgele üretilmiş yüksek kontrastlı benek deseni (detaylar için bkz. Bölüm 2.4).

Mikrosertlik ölçümleri, her bir numuneye 500 gram yük 15 s uygulanmak suretiyle üniversal, otomatik sertlik ölçüm cihazında (*Duramin/Struers*) oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sertlik numuneleri, EKAP pres eksenine paralel doğrultuda hazırlanmıştır. Ölçümler sırasında, uygulanan Vickers sertlik izleri arasındaki minimum güvenli mesafe korunmuştur. Sertlik değerleri, her bir numunede gerçekleştirilen altı ölçümün aritmetik ortalaması alınmak suretiyle hesaplanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Sertlik ölçümü esnasında Vickers sertlik izlerinin numune üzerindeki yerleri. Her bir numunede altı ölçüm gerçekleştirilmiş ve aritmetik ortalamalar ile standart sapmalar hesaplanmıştır.

2.4 Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) Deformasyon Analizi

Gerçekleştirilen mekanik testlerde, yer değiştirme ve yüzey gerinim alanları DIC (digital image correlation) yöntemi ile ölçülmüştür. DIC temassız, optik ölçüm tekniği, tam alan yüzey yer değiştirme ve deformasyon analizine imkân vermektedir (Mehdikhani et al. 2016, Pan et al. 2009). Bu yöntem ile deformasyon analizi için incelenecek numune yüzeyinde rastgele gri seviyesi yoğunluk dağılımı sağlanacak şekilde benekleme uygulanmalıdır. Bu çalışmada, boya püskürtücü vasıtası ile numune yüzeyine siyah ve beyaz boya püskürtülerek dog-bone çekme numune yüzeylerinde tekrarsız, isotrop ve yüksek kontrastlı desenler yapay olarak üretilmiştir. Bu yol ile çekme numunesi yüzeyinde üretilen tipik benek deseni Şekil 3'de gösterilmektedir. DIC yazılımı, farklı zamanlarda, test öncesi, deforme olmamış (*referans/as-received*) numune yüzey görüntüsü ve test esnasında, deforme olmuş numune yüzey görüntüleri olmak üzere kaydedilen dijital görüntüleri karşılaştırarak her bir noktanın (piksel) numune yüzeyindeki hareketini/yer değiştirmesini hesaplamaktadır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, yaklaşık 10 µm (10 µm/piksel) piksel genişliğine sahip gerinim değerleri saptanabilmiştir.

2D-DIC yönteminde quasi-statik mekanik testler esnasında görüntüleri elde etmek için optik eksenli numune yüzeyine dik şekilde konumlanmış, 2358 x 1728 piksel çözünürlüğe ve 1 Hz kare hızına sahip bir CCD kamera kullanılmıştır. Kullanılan lensin odak uzaklığı 100 mm olarak ayarlanmıştır. Objektif ve kamera sensörü arasındaki mesafeyi artırmak için bir uzatma halkası kullanılmış ve böylelikle çalışma mesafesi numune yüzeyinin odaklanmasını sağlamak adına optimize edilmiştir. DIC tekniği kullanılarak yüzlerce fotoğraf çok kısa sürede analiz edilebilmekte ve malzemelerin deformasyon davranışı yüzey gerinim alan fotoğraflarının birleştirilerek video haline getirilmesi ile detaylı bir şekilde analiz edilebilmektedir (Elibol 2018). DIC fotoğraflarının proses edilmesinde ve analizinde (lokal deformasyon ve yüzey gerinim alanları bağlamında) DIC yöntemine entegre ARAMIS yazılım paketi kullanılmıştır (GOM 2010). DIC yöntemi ile, çekme deneyleri esnasında ölçülen ve kaydedilen gerinim alanlarının daha sonra sisteme entegre bu yazılım vasıtası ile işlenmesinde sanal ekstansometre analizi uygulanarak mühendislik gerinimleri yüksek hassasiyetle hesaplanmıştır

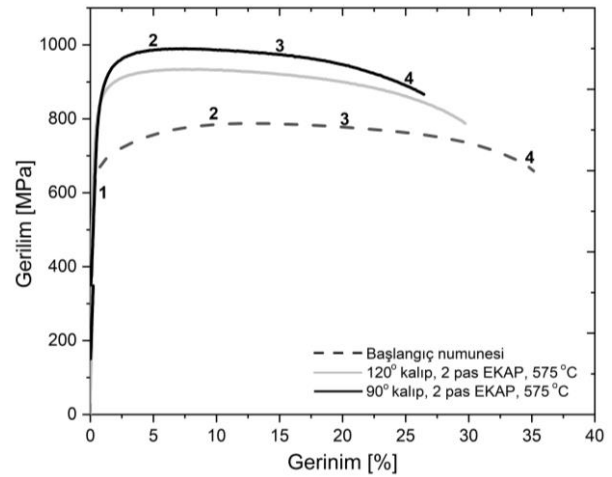
(sanal ekstansometre yöntemine dair detaylı bilgi için bkz. Elibol and Wagner 2018).

3. Bulgular ve Tartışma

Ti-6Al-4V alaşımına ait çekme testi, sertlik ve DIC makroskobik deformasyon analizi sonuçları aşağıda sunulmaktadır analiz edilmiştir.

3.1 EKAP İşleminin Ti-6Al-4V Alaşımının Çekme Dayanımı ve Süneklik Davranışı Üzerine Etkisi

Ti-6Al-4V alaşımına, EKAP öncesi kaba taneli (as-received durumda: referans/başlangıç numunesi olarak) ve 575 °C sıcaklıkta iki paso EKAP işlemi sonrası (90° ve 120° kanal iç açılımlarına sahip kalıplar kullanılarak) halde çekme testi uygulanarak mühendislik gerinim-gerinim eğrileri elde edilmiştir (Şekil 5). Bu grafikten elde edilen kopma uzaması ve çekme dayanımı değerleri Çizelge 1'de listelenmiştir.



Şekil 5. Başlangıç/referans numunesine, 120° ve 90° kalıp ile 575 °C sıcaklıkta EKAP işlemine maruz bırakılmış numunelere ait mühendislik gerinim-gerinim eğrileri. Eğriler üzerinde işaretlenmiş sayılar, Şekil 7'de verilen DIC yüzey gerinim alan görüntülerine karşılık gelmektedir.

700°C'de tavllanmış halde temin edilmiş olan Ti-6Al-4V numunesi EKAP deformasyonuna uğratılmadan, referans numunesi olarak çekme testine tabi tutulmuş ve çekme dayanımı 795,8 MPa, kopma uzaması ise %35,4 olarak hesaplanmıştır. İki paso 120° EKAP işlemi neticesinde referans numuneye göre malzemenin çekme dayanımında yaklaşık %15,4 artış; kopma uzamasında ise yaklaşık %15,8 azalma gözlemlenmiştir. Referans numuneye uygulanan iki paso 90° EKAP

deformasyonu neticesinde ise referans numuneye nazaran alaşımın çekme dayanımında yaklaşık %24,5'lik bir artış gözlenirken, kopma uzamasında %25,2'lik bir gerileme saptanmıştır. Akma dayanımı ise yaklaşık 1,3 kat artış (660 MPa → 890 MPa) göstermiştir. Bu artışa, uygulanan aşırı plastik deformasyon neticesinde α ve β fazlarının tane/alt tane boyutunda *Hall-Petch ilişkisi* (Denklem 1) doğrultusunda meydana gelen küçülmenin sebep olduğu söylenebilir. Bunun yanı sıra, 90° kanal iç açılı EKAP kalıbı kullanılarak görece daha yüksek bir toplam efektif aşırı plastik deformasyona (kaymaya) tabi tutulan numune, 120° iç açılı kalıba kıyasla yaklaşık 195 MPa daha yüksek bir çekme dayanımı değeri verirken, yaklaşık %3 daha düşük bir süneklik davranışı göstermektedir. Üiform uzama değerlerinde ise EKAP işlemi sonrası referans numuneye kıyasla (%13,3) önemli bir düşüş gözlenmiştir: Çift paso 120° EKAP sonrası %7,5 ve çift paso 90° EKAP sonrası %5,9 olarak saptanmıştır.

Çizelge 1. Ti-6Al-4V alaşımına ait farklı durumlar için kopma uzaması ve çekme dayanımı değerleri.

	Referans Numunesi	120° EKAP 2 Paso	90° EKAP 2 Paso
Kopma Uzaması [%]	35,4	29,8	26,5
Üiform Uzama [%]	13,3	7,5	5,9
Çekme Dayanımı [MPa]	795,8	918,3	990,5
Akma Dayanımı [MPa]	660±10	850±5	890±15

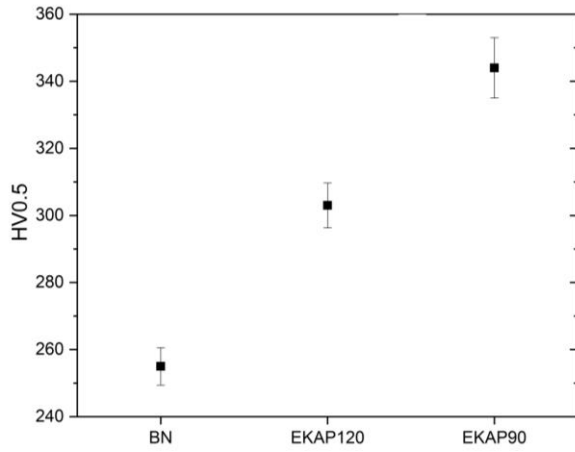
Yukarıda sunulan sonuçlar, Ti-6Al-4V alaşımının kaba taneli (as-received) ve EKAP işlemi sonrası tane inceltirilmiş durumdaki mekanik malzeme davranışının tipik özelliklerini sergilemektedir. EKAP işlemi sonrası malzemenin akma ve çekme dayanımında meydana gelen kayda değer artış, dislokasyon yoğunluğundaki yükselmenin sebep olduğu gerinim sertleşmesi ve tane inceltmesi ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Ti ve Ti alaşımlarında, ana deformasyon mekanizması olan dislokasyon hareketinin yanı sıra, özellikle birden fazla paso EKAP uygulanmış numunelerde, yüksek dislokasyon

yoğunluğuna bağlı olarak dislokasyon hareketinin giderek zorlaşması neticesinde ikizlenme mekanizması ile de plastik deformasyonun meydana geldiği raporlanmıştır (Yapıcı et al. 2006, Shin et al. 2003). Özellikle bu numunelerde, çoklu paso EKAP işlemi sonucu meydana gelen aşırı ikizlenme (tane inceltmesine benzer bir etki ile) dislokasyon hareketine engel teşkil ederek, yüksek akma sınırına katkıda bulunabilmektedir.

Aşırı plastik deformasyon neticesinde meydana gelen yüksek dislokasyon yoğunluğu, tane inceltmesi ve mikroyapıda (özellikle çoklu paso EKAP neticesinde) oluşması beklenen çok sayıda deformasyon ikizleri, malzeme mukavemetinde önemli derecede artışa sebep olurken, aynı zamanda sünekliğinde ciddi, kaçınılmaz bir düşüş meydana getirmektedir (kopma uzaması %35,4 → %26,5). Bununla beraber, üniform uzama da EKAP işlemi sonrasında %13,3'ten %5,9'a kuvvetli bir gerileme göstermiştir. Bu gerileme, çok ince taneli (aşırı plastik deformasyona maruz bırakılmış) metallerde yeni dislokasyon oluşumu ve akümülyasyonunun, *yüksek/kritik dislokasyon yoğunluğu, uzamış tanelerin içinde oluşan alt yapılar ve yüksek iç gerilim* gibi mikroyapısal karakteristikler neticesinde engellenmesi ile meydana gelebilecek *erken zamanlı deformasyon lokalizasyonuna (strain localization)* ve *kırılmaya* bağlanabilir (Vinogradov and Agnew 2004, Ma 2006).

3.2 EKAP İşleminin Sertlik Üzerine Etkisi

EKAP pres eksenine paralel doğrultuda hazırlanmış yüzeylerde gerçekleştirilen (her bir numune için altı ölçüm; bkz. Şekil 4) Vickers sertlik ölçümlerinden, farklı EKAP kanal iç açıları ve referans numune için elde edilen veriler Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafikten elde edilen sertlik değerleri (HV0,5) Çizelge 2'de listelenmiştir.



Şekil 6. Başlangıç/referans numunesi (BN) ve farklı kanal iç açıları (90° ve 120°) ile iki paso EKAP deformasyonuna tabi tutulmuş Ti-6Al-4V alaşımına ait Vickers sertlik değerleri (HV0,5).

Denklem 2'den de açıkça anlaşıldığı gibi $\Phi=90^\circ$ ($\Psi=0^\circ$) kalıp iç açısı, $\Phi=120^\circ$ ($\Psi=10^\circ$) kalıp iç açısına kıyasla numunede daha yüksek bir toplam efektif deformasyona (kaymaya) sebep olmaktadır. EKAP prosesinde kullanılan kalıp ve bununla beraber kayma alanı geometrisinin, hem deformasyonun homojenitesi hem de numunen maruz kaldığı toplam kayma deformasyonu şiddeti üzerine önemli bir etkisi vardır. EKAP kanal iç açısının ($\Phi = 60^\circ - 150^\circ$ arası) etkileri üzerine yapılan detaylı araştırmalar, 90° kanal iç açısının diğer açılara kıyasla en yüksek deformasyon homojenitesini verdiğini göstermektedir (Nagasekhar et al. 2007).

Çizelge 2. Ti-6Al-4V alaşımına ait karşılaştırmalı Vickers sertlik değerleri.

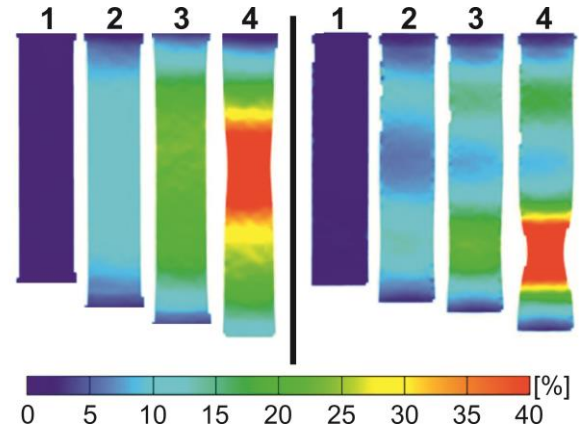
	Referans Numunesi	120° EKAP 2 Paso	90° EKAP 2 Paso
Vickers Sertlik (HV0,5)	255±6	303±7	343±9

Malzemenin sertlik değerinin, iki paso 120° EKAP işlemi neticesinde referans numuneye (255 HV) nazaran yaklaşık %19 artış göstererek 303 HV değerine ulaştığı ve 90° kanal iç açısına sahip kalıbın iki paso sonrası en yüksek sertlik değerini (343 HV) verdiği görülmektedir. Elde edilen bu sertlik değerleri, Çizelge 1'de verilen, ilgili işlem sonrası numunelerden elde edilen çekme dayanımı değerleri ile de *sertlik – çekme dayanımı arasındaki genel ilişki* bağlamında tutarlılık sergilemektedir (Zhang et al. 2011). Çift paso EKAP işlemi sonrası

çekme dayanımı davranışına paralel şekilde gözlenen sertlikteki büyük artışın muhtemel kaynakları arasında, dislokasyon yoğunluğunda artış, tane boyutundaki küçülme, mikroyapıda alt yapıların ve ikizlerin oluşması sıralanabilir.

3.3 EKAP İşleminin Ti-6Al-4V Alaşımının Makroskobik Deformasyon Davranışına (Moduna) Etkisi

EKAP deformasyonuna uğratılmadan, as-received halde ve 90° kanal iç açılı kalıp ile iki paso EKAP işlemi sonrasında Ti-6Al-4V numunelerine çekme testleri uygulanmıştır. Bu testler esnasında, yüzey gerinim alanları DIC yöntemi ile ölçülerek, malzemenin makroskobik deformasyon davranışı karakterize edilmiştir. Tek eksenli çekme testleri esnasında ölçülen eksenel yüzey gerinim alanları Şekil 7'de verilmiştir. DIC görüntülerinin üstündeki sayılar Şekil 5'teki gerilim-gerinim eğrilerinin üstünde işaretlenmiş olan noktaları göstermektedir.



Şekil 7. Çekme testleri esnasında ölçülen, eksenel DIC yüzey gerinim alanları (sol 1-4: As-received / referans numune; sağ 1-4: iki paso 90° EKAP işlemi sonrası numune). DIC görüntüleri üzerindeki sayılar Şekil 5'te verilen gerilim-gerinim eğrilerinin üzerinde işaretlenmiş noktaları belirtmektedir.

Referans numune homojen bir deformasyon davranışı sergilerken (Şekil 7 sol), iki paso 90° EKAP işlemine maruz bırakılmış numune ise (Şekil 7 sağ) akma sınırının aşılması ile lokalize olmuş (inhomojen) bir makroskobik deformasyon modu göstermektedir. Numunenin üst ve alt kısımlarında iki deformasyon bandı oluşumu ile gerinim sertleşmesi yerine nispeten sabit bir gerilim platosu gözlenmektedir (bkz. Şekil 7 sağ 2. DIC görüntüsü)

ve Şekil 5). Uygulanan gerininin devamı ile numune, deformasyonun lokalize olduğu bölgelerde gerininin kuvvetle artması sonucu kopmaktadır (Şekil 7 sağ 2-4). Çekme testlerinde, konvansiyonel clip-on ekstansometrelerin kullanılması halinde (bazı hallerde) numune, temasa uğradığı noktalardan boyun vererek-kopma gösterebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, deformasyon/şekil değiştirme ölçümü temassız, optik DIC sistemi ile gerçekleştirildiğinden numuneler mekanik testler esnasında hiçbir şekilde tahribata uğratılmamış ve hiçbir noktada deformasyon tetiklenmemiştir. Şekil 5 ve 7 incelendiğinde, malzemenin sünekliği ve makroskobik deformasyon modu arasındaki ilişki açıkça gözlenmektedir. Daha erken bir gerinim seviyesinde meydana gelen kayma bandı oluşumu ile deformasyon lokalizasyonu neticesinde gerinim sertleşme kapasitesinin gerilemesi ile beraber iki paso EKAP işlemine tabi tutulan numune, referans numuneye kıyasla daha kötü bir süneklik davranışı sergilerken, üniform uzama da buna bağlı olarak ciddi bir düşüş göstermiştir.

Pek çok metalik malzemede, farklı yüklenme koşullarında plastik deformasyon lokalizasyonu gözlenmektedir. Bu malzeme fenomeni, malzemenin şekil verilebilirliğine etkisinin yanı sıra mekanik özelliklerine ve kırılma mekanizması/davranışı üzerine de etkimektedir. Deformasyonun lokalize olması durumu, bu nedenle teknik uygulamalarda oldukça önemli bir rol oynamaktadır (Antolovich and Armstrong 2014, Lee and Chan 1991). Aşırı plastik deformasyon işlemleri esnasında deformasyon lokalizasyonuna etkileyen faktörler, literatürde genellikle başlangıç numunesinin tane boyutu, tane oryantasyonu, tekstür, uygulanan EKAP rotası/paso sayısı, pres hızı gibi malzeme ve proses parametreleridir (Joshi and Ramesh 2008, Liu et al. 1998, Og-ishi et al. 2005, Sabirov et al. 2009).

EKAP prosesi esnasında malzemenin dikey kanaldan yatay kanala geçişi esnasında, elastik deformasyon neticesinde numunenin bir kısmı kayma alanını geçerek yatay kanalda bir matris bandı oluşturmakta olup, akabinde gerilimin artmasıyla lokal olarak akma sınırına erişilmesiyle

kayma bantlarının oluşumu söz konusudur (Frint 2015). Bu doğrultuda, EKAP esnasında deformasyon lokalizasyonuna uğramış malzemelerin EKAP sonrası plastik deformasyonunda da inhomojen davranış gösterebileceği öngörülmüştür. Bu çalışma kapsamında ölçülen Ti-6Al-4V alaşımının DIC yüzey deformasyon dağılımları, iki paso EKAP neticesinde malzemenin homojen deformasyon modundan inhomojen bir deformasyon karakteristiğine geçiş eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, EKAP sırasında kayma bandı oluşumuna bağlı olarak EKAP işlemine tabi tutulan numunenin çekme testi esnasında deformasyonun erken zamanlı lokalize olması sonucu malzemenin sünekliğinin gerilemesi ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Böylelikle, kalıp geometrisi, pres hızı, EKAP rotası, karşı basınç gibi parametreler göz önünde bulundurulmak suretiyle EKAP prosesi esnasında inhomojen deformasyon (matris/kayma bandı oluşumu) engellenmesi ile aşırı plastik deformasyon sonucunda tane boyutu incelmeye bağlı mukavemetlendirmenin yanı sıra malzemenin sergilediği süneklik davranışı da iyileştirilebilir.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, aşırı plastik deformasyon tekniği EKAP ile tane boyutu inceltmiş Ti-6Al-4V alaşımı üretilmiş olup; EKAP prosesinin alaşımın mekanik özellikleri ve makroskobik deformasyon modu üzerine etkisi sistematik bir şekilde araştırılmıştır. Elde edilen önemli bulgular aşağıda sıralanmıştır:

1. Ti-6Al-4V alaşımının çift paso EKAP prosesine tabi tutulması neticesinde, tane incelmeye sonucu çekme dayanımı 795,8 MPa'dan 120° iç açılı kalıp kullanımı ile 918,3 MPa'a, 90° iç açılı kalıp kullanımında ise 990,5 MPa'a yükselmiştir. Bununla beraber, malzemenin kopma uzaması (120° için %29,8 ve 90° için %26,5) ve üniform uzama (120° için %7,5 ve 90° için %5,9) değerlerinde, %35,4 kopma uzaması ve %13,3 üniform uzama gösteren referans (EKAP öncesi) numuneye kıyasla ciddi bir gerileme gözlenmiştir.

2. Malzemenin mekanik davranışında gözlenen tipik çekme dayanımı artışına paralel şekilde, çift paso

EKAP işlemi sonrası malzemenin sertliği 255 HV'den 303 HV (120° kalıp) ve 343 HV (90° kalıp) seviyelerine yükselmiştir.

3. DIC tekniği kullanılarak elde edilen lokal yüzey deformasyon alanları, malzemenin tane incelmeye bağlı dayanım artışı sonucu süneklik davranışında meydana gelen gerileme ile makroskobik deformasyon modu arasındaki ilişkiyi göstermiştir. EKAP prosesinde lokal matris ve kayma bantlarının oluşumunun, farklı proses ve malzeme parametrelerine bağlı olarak engellenebilmesi durumunda, EKAP sonrası malzemenin yeniden plastik deformasyonunda erken zamanlı lokalizasyonunun önüne geçilerek mukavemet artışıyla beraber süneklikteki gerilemenin iyileştirilebileceği ortaya konmuştur.

5. Kaynaklar

- Antolovich, S.D. and Armstrong, R.W., 2014. Plastic strain localization in metals: origins and consequences. *Progress in Materials Science*, **59**, 1-160.
- Barao, V.M.T., Mathew, M.T., Assuncao, W.G., Yuan, J.C.C., Wimmer, M.A. and Sukotjo, C., 2012. Stability of cp-Ti and Ti6Al4V alloy for dental implants as a function of saliva pH, an electrochemical study. *Clinical Oral Implants Research*, **23**, 1055-1062.
- Barber, R.E., Dudo, T., Yasskin, P.B. and Hartwig, K.T., 2004. Product yield for ECAE processing. *Scripta Materialia*, **5**, 373-377.
- Boyer, R. R., 1995. Titanium for aerospace: rationale and applications. *Advanced Performance Materials*, **2**, 349-368.
- Elibol, C., 2018. Lokalisierungs- und Relaxationsphänomene in pseudoelastischen und martensitischen NiTi-Formgedächtnislegierungen. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Chemnitz, 160, 71-75.
- Elibol, C., Wagner, M.F.-X., 2018. Virtual Extensometer Analysis of Martensite Band Nucleation, Growth, and Strain Softening in Pseudoelastic NiTi Subjected to Different Load Cases. *Materials*, **11**, 1458.
- Estrin, Y. and Vinogradov, A., 2013. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Materialia*, **61**, 782-817.
- Evstifeev A.D. and Valiev R.R., 2019. Study of the dynamic strength of the ultrafine-grained titanium VT 1-0. *Materials Science and Engineering*, **672**, 012063.
- Frint, P., 2015. Lokalisierungsphänomene nach kombinierter hochgradig plastischer Umformung durch Extrusion und ECAP einer 6000er-Aluminiumlegierung. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Chemnitz, 164, 112-130.
- Gleiter, H., 1989. Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, **33**, 223-315.
- Gleiter, H., 2000. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, **48**, 1-29.
- GOM Gesellschaft für optische Messtechnik mbH (Braunschweig, Germany), Software "ARAMIS" v6.3.1 Optical Deformation Analysis, 2010.
- Hall, E.O., 1951. The Deformation and Ageing of Mild Steel: II, Characteristics of the Lüders Deformation. *Proceedings of the Physical Society*, **64**, 742-753.
- Han, S. Z., Lim, S. H., Kim, S., Lee, J., Goto, M., Kim, H. G., Han, B. and Kim, K. H., 2016. Increasing strength and conductivity of Cu alloy through abnormal plastic deformation of an intermetallic compound. *Scientific Reports*, **6**, 30907.
- Hussein, M.S and Fekry, A.M., 2019. Effect of fumed silica/chitosan/Polyvinylpyrrolidone composite coating on the electrochemical corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy in artificial saliva solution. *ACS Omega*, **4**, 73-78.
- Iwahashi, Y., Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., 1998. Microstructural characteristics of ultrafine-grained aluminum produced using equal-channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **29**, 2245-2252.
- Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., 1998. The process of grain refinement in equal-

- channel angular pressing. *Acta Materialia*, **46**, 3317-3331.
- Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., 1996. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials, *Scripta Materialia*, **35**, 143-146.
- Joshi, S.P. and Ramesh, K.T., 2008. Grain size dependent shear instabilities in body-centered and face-centered cubic materials. *Materials Science and Engineering A*, **493**, 65-70.
- Khereddine, A. Y., Larbi, F. H., Kawasaki, M., Baudin, T., Bradai, D. and Langdon, T. G., 2013. An examination of microstructural evolution in a Cu–Ni–Si alloy processed by HPT and ECAP. *Materials Science and Engineering A*, **576**, 149-155.
- Langdon, T.G., 2013. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement. *Acta Materialia*, **61**, 7035-7059.
- Lee, W.B. and Chan K.C., 1991. A criterion for the prediction of shear band angles in F.C.C. metals. *Acta Metallurgica et Materialia*, **39**, 411-417.
- Leyens, C. and Peters, M., 2002. Titanium and titanium alloys. John Wiley & Son Inc, England, 1-35.
- Liu, Q., Juul Jensen, D. and Hansen, N., 1998. Effect of grain orientation on deformation structure in cold-rolled polycrystalline aluminium. *Acta Materialia*, **46**, 5819-5838.
- Liu, J.Z., Qi, Y.G., Zheng, J.L. et al., 2018. New Approach to Achieve High Strength Powder Metallurgy Ti-6Al-4V Alloy Through a Simplified Hydrogenation Dehydrogenation Treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, **763**, 111-119.
- Ma, E., 2006. Eight routes to improve the tensile ductility of bulk nanostructured materials and alloys. *JOM*, **58**, 49-53.
- Mehdikhani M., Aravand M., Sabuncuoglu B., Callens M.G., Lomov S.V. and Gorbatiikh L., 2016. Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation. *Composite Structures*, **140**, 192-201.
- Moiseyev, V.N. 2006. Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications. Taylor & Francis, 1-216.
- Motyka, M., Sieniawski, J. And Ziaja, W., Microstructural aspects of superplasticity in Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering A*, **599**, 57-63.
- Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y. and Seow, H.P., 2007. Deformation behavior and strain homogeneity in equal channel angular extrusion/pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, **192-193**, 449-452.
- Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., 1998. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, **46**, 1589-1599.
- Og-ishi, K., Zhilyaev, A.P. and Mcnelley, T.R., 2005. Effect of strain path on evolution of deformation bands during ECAP of pure aluminum. *Materials Science and Engineering A*, **410-411**, 183-187.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A., 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, **20**, 17pp.
- Petch, N.J., 1953. The Cleavage Strength of Polycrystals. *The Journal of the Iron and Steel Institute*, **174**, 25-28.
- Phume, L., Popoola, A.P.I., Aigbodion, V.S. and Pityana, S., 2018. In-situ formation, anti-corrosion and hardness values of Ti-6Al-4V biomaterial with niobium via laser deposition. *International Journal of Surface Science and Engineering*, **12**, 23-39.
- Pippan, R. and Hohenwarther, A., 2016. The importance of fracture toughness in ultrafine and nanocrystalline bulk materials. *Materials Research Letters*, **4**, 127-136.
- Popoola, A.P.I., Phume, L., Pityana, S. and Aigbodion, V.S., 2016. In-situ formation of laser Ti6Al4V-TiB composite coatings on Ti6Al4V alloy for biomedical application. *Surface Coating Technology*, **285**, 161-170.
- Sabirov, I., Barnett, M.R., Estrin, Y. and Hodgson, P.D., 2009. The effect of strain rate on the deformation mechanisms and the strain rate sensitivity of an

- ultra-fine-grained Al alloy. *Scripta Materialia*, **61**, 181-184.
- Segal, V., 1977. The method of material preparation for subsequent working. Patent, USSR Nr. 575892.
- Segal, V.M., Dobatkin, S.V. and Valiev R.Z., 2004. Equal-channel angular pressing of metallic materials: Achievements and trends. Selection of articles: Part I, *Russian Metallurgy*, **1**, 1-102.
- Segal, V.M., Reznikov, A.E., Drobyshevskiy, A.E. and Kopylov, V.I., 1981. Plastic working of metals by simple shear. *Russian Metallurgy*, **1**, 99-105.
- Semenova, I.P., Polyakov, A.V., Polyakova, V.V. et al., 2017. Mechanical behavior and impact toughness of the ultrafine-grained Grade 5 Ti alloy processed by ECAP. *Materials Science and Engineering A*, **696**, 166-173.
- Senkov, O.N., Miracle, D.B. and Firstov, S.A., 2004. Metallic Materials with High Structural Efficiency, Kluwer Academic Publishers, N.Y., 47-54.
- Shin, D.H., Kim, I., Kim, J. et al., 2003. Microstructure Development During Equal-Channel Angular Pressing of Titanium. *Acta Materialia*, **51**, 983-996.
- Smirnova, N.A., Levit, V.I., Pilyugin, V.P., Kuznetsov, R.I., Davydova, L.S. and Sazonova, V.A., 1986. Evolution of structure of FCC single crystals during strong plastic deformation. *The physics of metals and metallography*, **61**, 127-134.
- Stüwe, H.P., 2003. Equivalent Strains in Severe Plastic Deformation. *Advanced Engineering Materials*, **5**, 291-295.
- Valiev, R.Z., Estrin, Y., Horita, Z. et al., 2016. Fundamentals of Superior Properties in Bulk NanoSPD Materials. *Materials Research Letters*, **4**, 1-21.
- Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K. and Alexandrov, I.V., 2000. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, **45**, 103-189.
- Valiev, R.Z. and Langdon, T.G., 2006. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, **51**, 881-981.
- Vinogradov, A.Y. and Agnew, S.R., 2004. Fatigue of Nanocrystalline Materials, in: Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Marcel-Dekker, 2269-2288.
- Yapici, G.G., Karaman, I. and Luo Z.P., 2006. Mechanical Twinning and Texture Evolution in Severely Deformed Ti-6Al-4V at High Temperature. *Acta Materialia*, **54**, 3755-3771.
- Yu, H., Yan, M., Li, J. et al., 2018. Mechanical properties and microstructure of a Ti-6Al-4V alloy subjected to cold rolling, asymmetric rolling and asymmetric cryorolling. *Materials Science and Engineering A*, **710**, 10-16.
- Zhang, P., Li, S.X. and Zhang Z.F., 2011. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and Engineering A*, **529**, 62-73.
- Zhao, Z., Wang, G., Zhang, Y., Gao, J. and Hou, H., 2020. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Prepared by Multipass Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **1059-9495**.
- Zherebtsov, S.V., Kudryavtsev, E.A., Salishchev, G.A., Straumal, B.B. and Semiatin, S.L., 2016. Microstructure evolution and mechanical behavior of ultrafine Ti6Al4V during low-temperature superplastic deformation. *Acta Materialia*, **121**, 152-163.
- Zhu, Y.T., Lowe, T.C. and Langdon, T.G., 2004. Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*, **51**, 825-830.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045801 (683-692)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045801 (683-692)

DOI: 10.35414/ akufemubid.707341

Araştırma Makalesi / Research Article

Borehole Geology and Alteration Mineralogy of Well Bayatçık-1, Bayatçık Geothermal Area, Afyonkarahisar

Ahmet YILDIZ^{1*}, Can BAŞARAN¹, Metin BAĞCI¹, Alper DÜLGER², Yusuf ULUTÜRK³¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.³ AFJET, Afyon Jeotermal Turizm ve Ticaret A.Ş., Afyonkarahisar.

Sorumlu yazar e-posta:* ayildiz@aku.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9077-0628>

cbasaran@aku.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6281-6580>

mbagci@aku.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1056-2854>

alperdulger@outlook.com.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3380-7663>

uluturkyusuf@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1840-5060>

Geliş Tarihi: 22.03.2020

Kabul Tarihi: 13.07.2020

Abstract

Bayatçık geothermal field is located 7 km northwest of the Afyonkarahisar. The aim of this study is to determine the borehole geology and hydrothermal alteration mineralogy of Bayatçık-1 well, was drilled in 2013. The well is 925 meters deep. The types of rock that were encountered in this well were alluvium, volcanic and sedimentary sections of the Köprülü volcanosedimenter sequence, basal conglomerate, marble and schist sections. The cover rocks of the geothermal system consisting of volcanic and sedimentary rocks were drilled in the first 528m. Basal conglomerate was observed in 528-558 m level. Marble unit (Mrb1), which is the reservoir rock of the geothermal system at depths of 558-574 m, micaschist (Sch1) between 574-622 m, marble-2 between 622-746 m (Mrb2), micaschist-2 (Sch2) between 746-830 m, marble-3 between 830-890 m (Mrb3) and finally at depths of 890-920 m is a schist unit which acts as the impermeable basement rock of the system. The analyzes such as stereo and polarizing light microscope, x-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM) were applied to the clastic samples taken at 2m intervals from Bayatçık-1 well. The result of the study is aimed to reveal the development of the geothermal system in the Bayatçık region by the differences in the hydrothermal alteration mineralogy of the samples. In the study, mineralogical-petrographical data were obtained with the presence of smectite, illite and kaolinite minerals formed at a temperature lower than 200°C.

Keywords

Alteration mineralogy;
Borehole geology;
Geothermal; Bayatçık;
Afyonkarahisar

Bayatçık Jeotermal Sahasında (Afyonkarahisar) Yer Alan Bayatçık-1 Kuyusunun Jeolojisi ve Alterasyon Mineralojisi

Öz

Bayatçık jeotermal sahası Afyonkarahisar ilinin 7 km kuzeybatısında yer almaktadır. Bu çalışmanın amacı 2013 yılında açılan Bayatçık-1 kuyusunun kuyu içi jeolojisi ve hidrotermal alterasyon mineralojisini belirlemektir. 925 metre derinliğindeki sondaj boyunca; Köprülü volcanosedimenter istifinin alüvyon, volkanik ve sedimenter kısımları ile taban konglomerası, mermer ve şist birimleri kesilmiştir. İlk 528 m'de jeotermal sistemin örtü kayaları olan volkanik ve sedimenter kayalar, 528-558 m'lerde taban konglomerası, 558-574 m derinlikte Jeotermal sistemin rezervuar kayası olan mermer (Mrb1), 574-622 m arasında mikaschist (Sch1), 622-746 m arasında mermer-2 (Mrb2), 746-830 m arasında mikaschist-2 (Sch2), 830-890 m arasında mermer-3 (Mrb3) ve son olarak 890-920 m derinliklerde sistemin geçirimsiz temel kayası olan şist birimleri geçilmiştir. Bayatçık-1 kuyusundan 2m aralıklarla alınan klastik örnekler stereo ve polarize mikroskop, x-ışını difraktometre (XRD) ve tarama elektron mikroskobu (SEM) gibi analizler uygulanarak, Bayatçık bölgesindeki jeotermal sistemin gelişimini örneklerin hidrotermal alterasyon mineralojisindeki farklılıklar ile ortaya koymak amaçlanmıştır. Çalışmada 200°C'den düşük sıcaklıkta oluşan simektit, illit ve kaolinit minerallerinin varlığıyla ilgili mineralojik-petrografik verilere ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler

Alterasyon mineralojisi;
Kuyu jeolojisi;
Jeotermal; Bayatçık;
Afyonkarahisar

1. Introduction

Hydrothermal alteration areas are the most important surface signatures of geothermal sources such as fumarols, hot springs and heated areas; they act as the windows of geothermal systems located deep in the earth. The water-rock interaction in geothermal areas changes mineralogical, geochemical, and physical properties of rocks, this is known as hydrothermal alteration. (Henley ve Ellis, 1983; Velde, 1995; Lagat, 2010). Mineralogical changes caused by hydrothermal alteration are very important for the exploration and development of geothermal systems.

Turkey is located on the Alpine-Himalayan geothermal belt and has high geothermal potential. Our country's total geothermal heat capacity (apparent heat amount) has reached 35,500 MWt and total geothermal heat capacity (usable heat amount) has reached 5.000 MWt at the end of 2018 (İnt.Kyn.1). There are around 1000 hot springs and natural mineral water springs in Turkey, where the effects of young tectonism and volcanism are observed intensively. 170 of these water sources have 40°C or higher temperature. 79% of these resources are in Western Anatolia (Denizli, Aydın, İzmir, Çanakkale, Afyonkarahisar, Kütahya etc.), 8.5% in Central Anatolia, 7.5% in Marmara Region, 4.5% Eastern Anatolia and 0.5% in other regions. Most of the geothermal resources in Afyonkarahisar province are located in the Akarçay Basin, Ömer-Gecek, Gazlıgöl, Hüdai, Heybeli and the İscehisar-Susuz regions are the most important geothermal areas in the region (Yıldız et al. 2014). The Bayatçık geothermal area is located on Afyonkarahisar-Eskişehir highway, 8km north of Afyonkarahisar. The thermal waters have Na-Ca-HCO₃-Cl type and have 65°C temperature (Duysak, 2019). 10 wells have been drilled in the region, 8 of them are used as production, and 2 of them are used as reinjection wells. The aim of this study is to determine the borehole geology and hydrothermal alteration mineralogy of Bayatçık-1 geothermal well, which was drilled in 2013 with a depth of 925m.

2. Geology

2.1 Geology of study area

Paleozoic Afyon metamorphics are the basement rocks of the study area. This formation consists of Bayramgazi schists and Oyuklutepe marbles. Middle-Upper Miocene aged Ömer-Gecek formation unconformably overlies the basement rocks. The unit is composed of Başçakmaktepe conglomerate and Köprülü volcano-sedimentary sequence. Middle-Upper Miocene aged Seydiler tuff and agglomerate shows lateral and vertical transitions with Ömer-Gecek formation. The Upper Miocene Kocatepe trachyte is the last product of the volcanism. Quaternary alluvial deposits are the youngest units in the study area (Metin et al., 1987; Ulutürk, 2009; Yıldız et al., 2014) (Figure 1).

Bayramgazi schists comprise albite-chlorite-muscovite-biotite-quartzschist, calcschist and quartzites are also observed in cracks. Mineral paragenesis of low grade greenschist facies was determined in this unit. Oyuklutepe marbles occur stratigraphically the upper section of Afyon metamorphics. and display violet, sugar and gray colored textures (Metin et al., 1987; Öktü et al., 1996; Kibici et al., 2001; Ulutürk, 2009; Yıldız et al., 2010; Yıldız et al., 2011), (Figure 1).

The Başçakmaktepe conglomerate unit of Ömer-Gecek formation, has dark yellow, reddish color, and thick bedded, contains sedimentary structures such as cross-bedding, hollow-fill and channel structures, drying cracks, and traces of currents. The Köprülü volcano-sedimentary (KVS) sequence includes volcanic intercalations of lava and pyroclastic type and epiclastic sediments. In the upper sections of these unit, clayey limestones, tuff, ash discharge, and opalite silica layers are observed. The Upper Miocene Erkmen volcanics are the final product of volcanism in the region. This unit consists of agglomerated pyroclastics and lava flows and formed during pre-caldera activities during the physical development process of the Afyon stratovolcano. Pyroclastics are generally gray, dark gray colored, and contain trachytic, trachyandesitic blocks and lithic fragments. The

another unit of Erkmen volcanics are trachyte and trachyandesite lavas. The unit forms the highest elevations in the region in the form of dome

structures, it is characterized by gray, dark gray, and brownish. Quaternary travertine and alluvium are the youngest units in the study area.

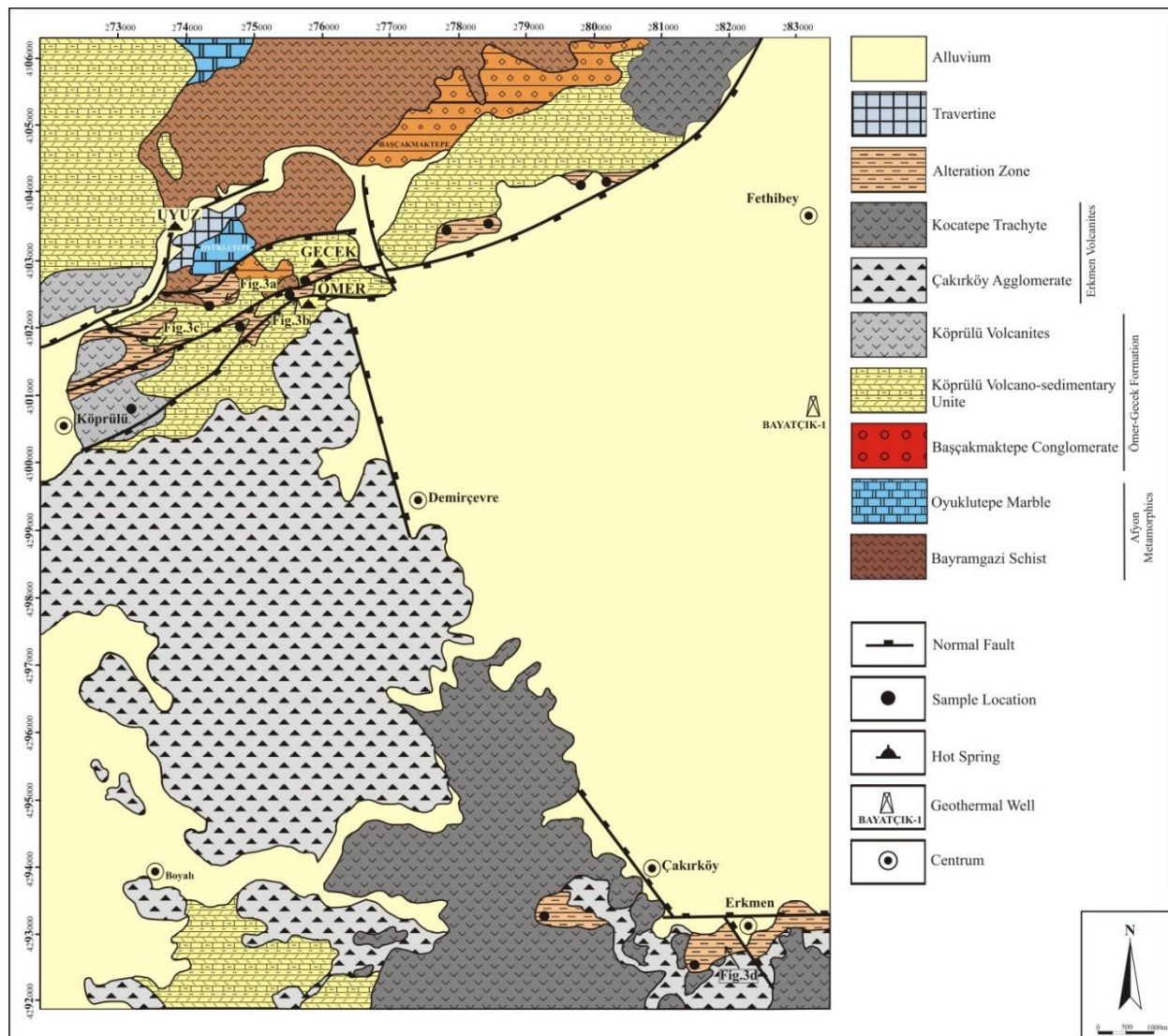


Figure 1. The geology map of study area (Ulutürk, 2009; Yıldız et al., 2011).

2.2 Borehole Geology

The well Bayatçık-1 is located 7 km northwest of the Afyonkarahisar city center. The coordinates (ED50 system) of well are: X = 283315 and Y = 4300156 and Z = 1012m. The well was drilled in 2013 by Afyon Geothermal Facilities Tourism, Industry and Trade Inc. (AFJET), is 925 m in depth and a temperature of 65°C. The types of rocks that were encountered in this well were alluvium, volcanic and sedimentary units from the Köprülü volcano-sedimentary (KVS) sequence, basal conglomerate, marble and schists. The lithological

description of rocks is based on binocular observations. The columnar section of Bayatçık-1 well is shown in Figure 2.

Alluvium was drilled in the first 102 m of the well. Volcanic and sedimentary units of the Köprülü volcano-sedimentary (KVS) sequence appear at depths of 102-526 m. There are pyroclastics and lavas in 102-134 m (Pr1), 146-150 m (Pr2), 164-178 m (Pr3), 202-208 m (Pr4), 244-278 m (Pr5-Pr7), 290-300 m (Pr8.), 331-336 m (Pr9), 352-366 m (Pr10), 368-410m (Lv1; Pr11; Lv2; Pr12), 424-466m (Lv3; Pr13). Pyroclastic rocks have trachy andesite composition, are glassy in texture and consists of

sanidine, plagioclase, biotite and hornblende phenocrystals.

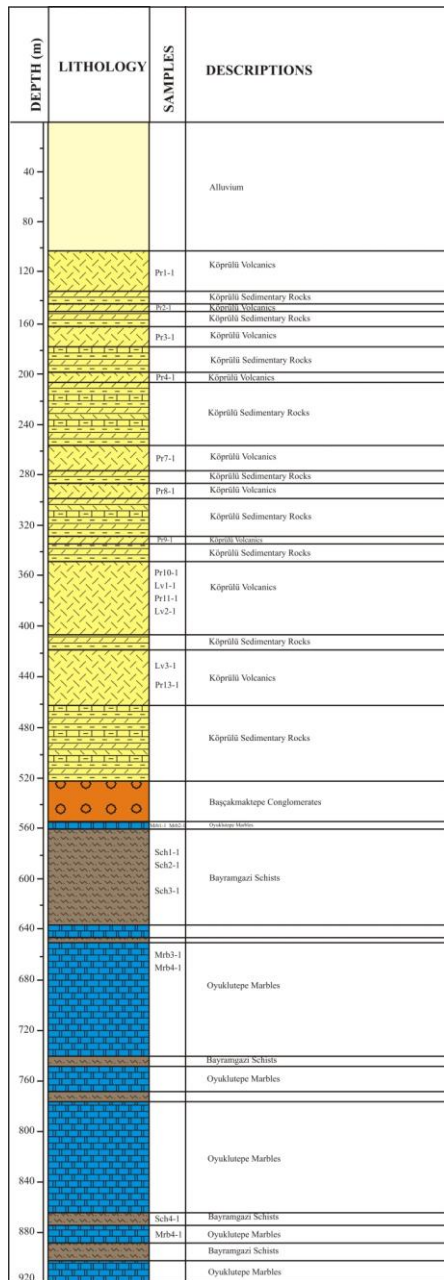


Figure 2. The borehole geology of Bayatçık-1 well.

The fresh surface of this unit are gray and the altered surface have light gray to yellowish gray color. The alteration occurs in the matrix and the feldspars of the rock. Lava have dark gray color and contain intense cooling spaces, they are composed of plagioclase, sanidine, mica and hornblende minerals. As a result of alteration, the color of hornblende changed to light gray and milky brown.

The sedimentary sequence of KVS were drilled at 136-144 m (Sd1), 152-162 m (Sd2), 180-200 m (Vs1), 210-242 m (Vs2), 280-288 m (Vs3), 302-330 m (Vs4), 338-350 m (Vs5), 412-420 m (Vs6), 412-422 m (Vs6) and 468-526 m (Vs7). Sd coded levels sections are dominated by cream colored marl, otherwise the Vs coded levels are volcanic rock, marl, and clay type sedimentary rock. The red colored basal conglomerate (Tk) is found between 528 and 560m and separates the covered and reservoir rocks.

Afyon metamorphics, comprise marble and schist intercalation, were drilled at 560-920 meters. Marbles are generally gray, light gray, cream and light yellow colors. Calcite and dolomite are the main minerals in the marbles and they contain small amounts of muscovite minerals. At the altered marbles, the crystallized texture is changed and the color is lightened. Secondary iron minerals, hematite and limonite, were also formed along the crystal boundaries and cracks. The marble were observed at 560-564 m (Mrb1; Mrb2), 642-744 m (Mrb3; Mrb4), 754-772 m, 830-866 m, 880-890 m (Mrb5) levels. The thickness of marbles vary between 2-84 m.

The Bayramgazi schists contain muscovite-schist calc-schist and show gradual transitions to marble. The schists are mostly composed of feldspar, quartz, muscovite, and small amounts of calcite and dolomite minerals. The secondary iron minerals (probably hematite) formed due to alteration along the fracture and schistosity planes. The schists were found at 564-640 m (Sch1; Sch2, Sch3), 746-780 m, 770-786 m (Sch4) and 894-904 m.

2.3 Geological Properties of Geothermal System in Bayatçık Area

The Bayatçık geothermal field in the Akarçay basin was formed due to the effect of the extensional tectonics of Western Anatolia. The Afyonkarahisar region is located on a second degree earthquake zone. There is also the active Erkmen (Demirçevre)

and Gecek faults of Afyon-Akşehir graben system observed in the area.

The Paleozoic Oyuklutepe marble is the reservoir rock of geothermal system, the impermeable units of volcano-sedimentary units are cover rocks and Bayramgazi schists are impermeable basement rocks. The recharge involves surface and underground waters infiltrating the basin. The geothermal fluid ascends to the productive aquifers through the major faults and ascend to the surface via by Afyon-Akşehir Graben faults after being heated at greater depth.

According to the geothermal model; meteoric waters falling on to the high elevation areas of the Ömer-Gecek region percolate into the reservoir rocks along faults and fracture zones, they are then heated at depth, ascend to the surface by convection. Some of the waters, which are Na-Cl type due to deep circulation and high temperature, are obtained by drilling in the Ömer-Gecek region. Some of the waters also circulate towards the southeast, along the crack-fault zones, where it becomes enriched in Ca and HCO₃ due to a possible mixture-cooling effect, and are finally observed in the Bayatçık region (Duysak, 2019).

3. Methods

Drill cutting samples from well Bayatçık-1 were collected at every 2 m interval during the drilling operations. The wet cuttings from the rig site were washed to remove dust particles and later dried in electric ovens at 60 ± 5°C, archived and stored in clearly labelled containers with lids.

In order to reveal the alteration degree, alteration type, abundance of alteration minerals, and bedrock relationships with the lithological descriptions of the samples, stereo microscope studies were carried out using Leica DM300 digital microscope at Afyon Kocatepe University Department of Geological Engineering. Mineralogical properties of the altered samples were determined by using a stereo microscope and an X-ray diffractometer (XRD). XRD analysis were carried out on bulk samples and clay fraction. The bulk mineralogy conducted on -250µm grain size samples.

The clay mineralogy was determined by studying <2 mm particles. After dispersing the samples in distilled water overnight, the <2 mm size fraction was separated by sedimentation and subsequent centrifugation. Oriented samples were prepared from the clay fraction spread on glass slides and allowed to dry under atmospheric conditions. The dried samples were saturated with ethylene-glycol vapor at 60°C and heated at 550°C for 2 h. The X-ray diffraction (XRD) analyses of the oriented samples were performed on air-dried, ethylene glycol-solvated, and heated samples (Brown, 1972; Brown and Brindley, 1980) to identify the mineral abundances in the studied samples. XRD analysis of samples were performed by using Shimadzu XRD-6000 model X-ray diffractometer (Ni-filtered, CuKα radiation) at Afyon Kocatepe University Technology Application Research Center (TUAM). In the analysis, 40 kV (voltage) and 30 mA (current) diffraction values were selected. The scanned range was 2-70°2θ in bulk samples and 2-30°2θ in oriented samples at a scanning speed of 2θ°/min for all samples

Scanning electron microscope (SEM) was utilized to determine the mineralogical composition, surface morphology of the samples and to make microchemical analysis. For SEM investigations, decomposed samples with different mineralogical composition are coated with thin gold film to control the excess electrical charge from the SEM, thus obtaining a better quality image from the samples. The surface morphology and microchemical analysis with thin gold film of 250-300 Å thickness were carried out on an electron microscope with EDX equipped with LEO VP-1431 model at Afyon Kocatepe University Technology Application Research Center (TUAM).

4. Hydrothermal Alteration

Hydrothermal alteration is a geological process that changes the mineralogical, chemical, and physical properties of the original rock by the effect of hot water called “hydrothermal fluids”, steam and gas. As a result of water-rock interaction, the primary minerals turn into alteration minerals. The composition and permeability of the reservoir rocks, the chemical composition of the fluid, temperature, pressure and pH conditions of the rock during fluid interaction, and reservoir

processes such as mixing and boiling, and duration of activity, are several of the most important factors controlling the type of alteration minerals (Henley and Ellis, 1983; Reyes, 2000).

4.1 The distribution of alteration minerals

Illite and smectite occur in Köprülü volcanics at the upper 528 m of the Bayatcik-1 well, and dolomite occurs in the Oyuklutepe marbles and kaolinite found in Bayramgazi schists as a most important alteration minerals deeper parts 560 m depth (Figure 3). The first peak of illite is considered to be $d(001)$ 10Å, the second peak is $d(002)$ 5Å and the

third peak is $d(003)$ 3.33Å (Karakaya, 2006). In the XRD patterns of the clay fraction, $d(001)$ peaks of illite ranged between 10.05-10.79Å and $d(002)$ peak of 5.02-5.19Å in air dried samples (AD). The $d(001)$ spacing, reflect c-axis length of smectite, exhibits 12.53-12.87Å, expanded to 16.79-17.50Å after saturation with ethylene glycol (EG), and collapsed to 10.04-10.12Å after heating at 550°C (Figure 4).

$d(001)$ peak in 7.18-7.22Å remain unchanged by the ethylene glycol treatment. This peak collapsed completely after heating at 550°C due to dehydroxylation (Brindley and Brown, 1980).

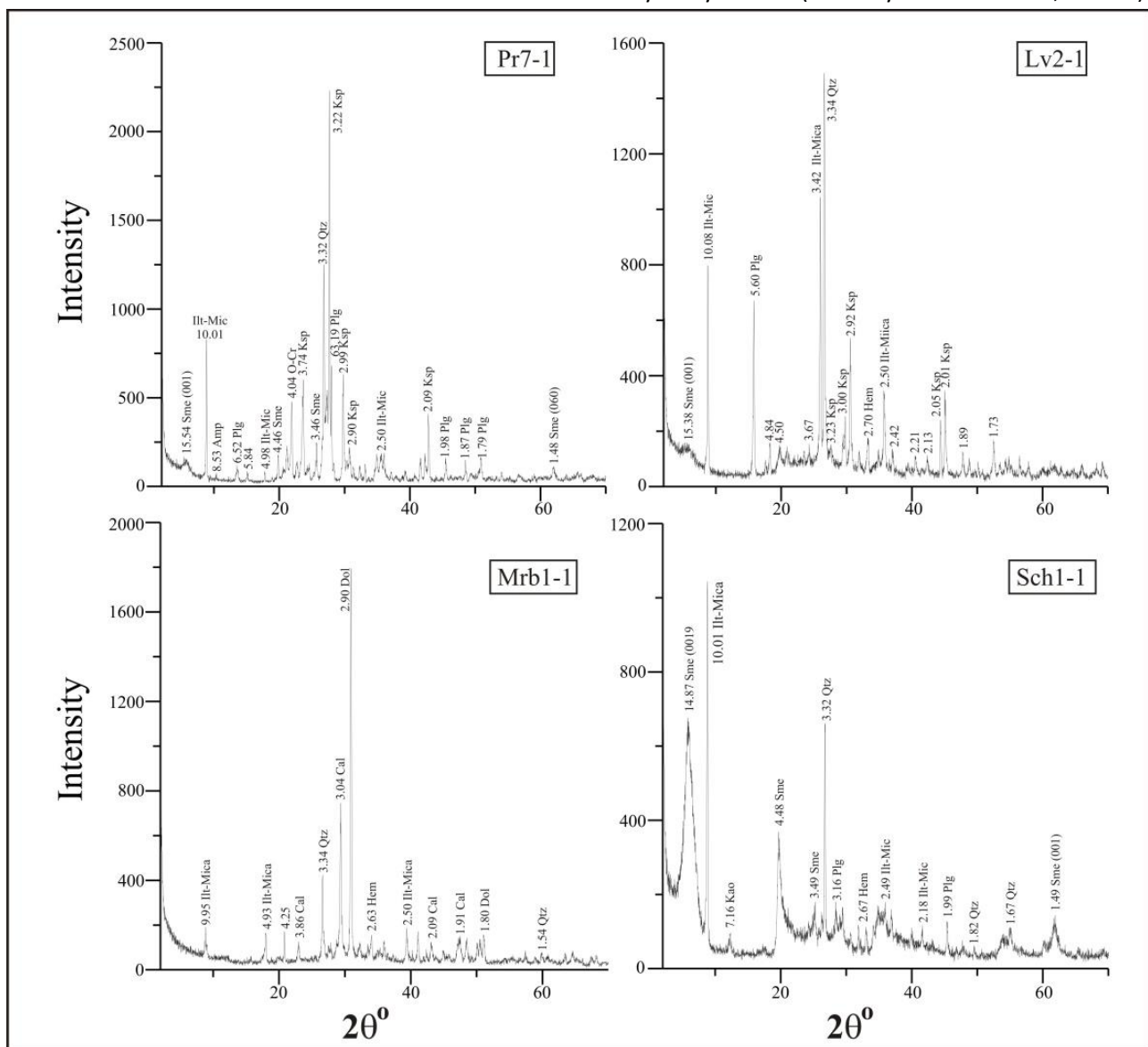


Figure 3. The whole rock XRD diagrams of representative samples from the BAYATCIK-1 well. (Sme): Smectite, (Ill-Mic): Illite-Mica, (Amp): Amphibole, (Plg): Plagioclase, (Kao): Kaolinite, (Qtz): Quartz, (Ksp): Alkali feldspar, (Hem): Hematite, (Cal): Calcite, (Dol): Dolomite

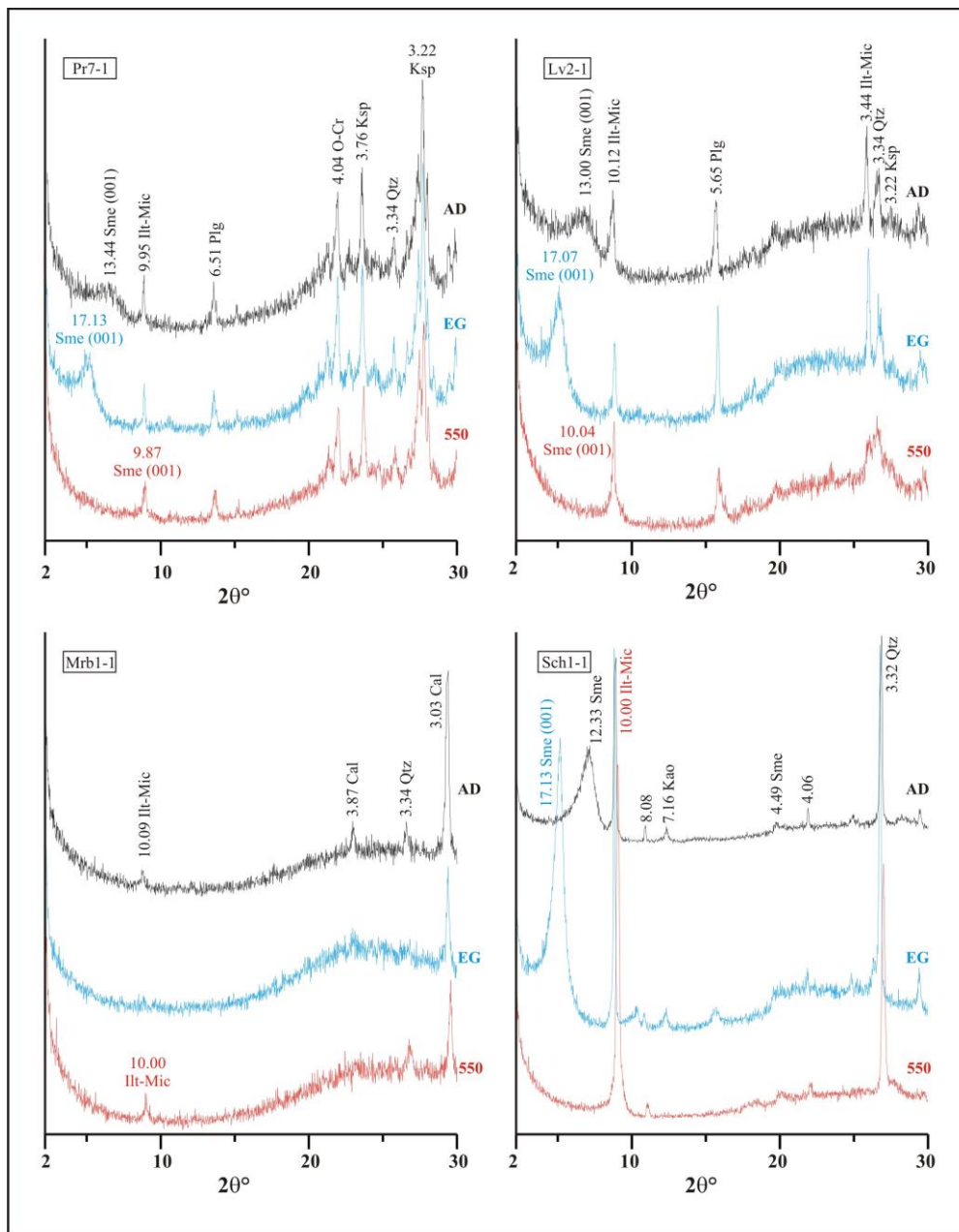


Figure 4. Representative XRD patterns of clay fraction of samples from the Bayatçık-1 well. Key to the symbols: (AD): Air dried, (EG): Ethylene glycolated, (550): Heated at 550 oC.

Hydrothermal alteration in Bayatçık geothermal area systems has been described in zones with respect to temperature (Figure 5). The sequence of alteration minerals depends on the temperature of the geothermal system (Franzson et al., 2008). In the mineral alteration temperature diagram developed by Franzson (1998), smectite, illite and kaolinite minerals indicate temperatures less than 200°C (Figure 6). Low temperature hydrothermal dioctahedral smectites has been referred close to the surface of the geothermal fields (Cole, 1988; Mizoto, 1998; Mas, 2003).

4.2. Hydrothermal alteration of primary minerals

Alteration was observed Köprülü volcanites, Oyuklutepe marbles, and Bayramgazi schist in Bayatçık-1 well. Alteration occurs as a result of the dissolution of primary minerals and precipitation of alteration minerals along the fractures and voids. Sanidine, plagioclase, biotite, quartz, hornblende and opaque minerals are the most important primary minerals in glassy matrix of volcanic rocks.

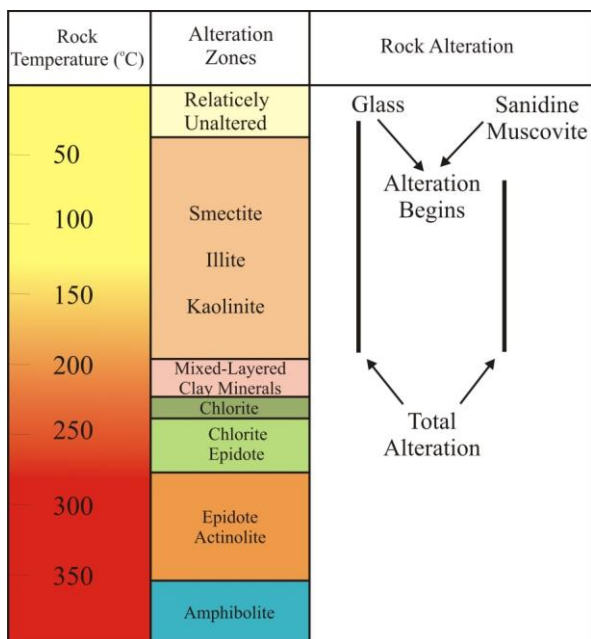


Figure 5. The temperature diagram of mineral alteration (Franzson, 1998).

The morphological and microchemical data related to the alteration of volcanic glass and feldspar were obtained SEM studies of Köprülü volcano-sedimentary sequence. The glassy matrix and feldspar of the volcanites altered to smectite and illite minerals in the form of flakes (Figure 3). The impoverishments in sodium, silicon, potassium and increments in magnesium, aluminum, calcium, titanium and iron were measured in smectite formation. The conversion of feldspar to illite is characterized by impoverishment of sodium, silicon and calcium and enrichment of magnesium, aluminum and iron (Figure 6; Table. 1).

Table 1. The main alteration minerals from BAYATÇIK-1 well.

Primary Minerals	Alteration Minerals
Volcanic Glass	Smectite
Volcanic Glass	Illite
Sanidine	Illite
Calcite	Dolomite
Muscovite	Kaolinite
Muscovite	Illite

The coexistence of calcium and magnesium in the marbles was proved that the marbles have dolomitic composition. The magnesium content increased due to the progressive alteration, thus the marbles have dolomitic composition. The schists comprise mica, quartz and calcite minerals. The presence of magnesium and iron together with

aluminum and potassium in mica minerals indicated biotite. Sodium, magnesium, silicon and potassium are lost decreased, aluminum remains immobilized, and calcium, titanium and iron are enriched during the alteration of biotite to kaolinite (Figure 6).

5. Conclusions

The following results were obtained in the study to determine the borehole geology and alteration mineralogy of Bayatçık-1 well in Bayatçık (Afyonkarahisar) geothermal area.

Alluvium, volcanic and sedimentary units of Köprülü volcano-sedimentary sequence, basal conglomerate, marble and schist levels drilled respectively in Bayatçık-1 well. In the upper parts 528m of the well, the cover rocks of the geothermal system consisting of volcanic and sedimentary rocks were observed. Basal conglomerate was passed between 528-558m. At the levels of 558-920m, Oyuklutepe marble, which is the reservoir rock of the geothermal system, and Bayramgazi schist, the impermeable basement rock are also found.

In the SEM investigations, it was observed that smectite and illite minerals in flaky morphology occur from the alteration of the volcanic glass and sanidine crystals. Moreover, the dolomitization of calcites in marbles and the conversion of biotite to kaolinite in schists are the most important alteration process at this level.

Illite and smectite occur in Köprülü volcanics at the upper 528m of Bayatçık-1 well, and dolomite in Oyuklutepe marbles and kaolinite in Bayramgazi schists are important alteration minerals at the deeper parts 560m.

The mineral alteration temperature diagram developed by Franzson (1998), show that the alteration mineral geothermometer indicates temperatures below 200°C for Bayatçık-1 well.

Acknowledgements

The present study was subsidized by the Coordinatorship of Scientific Research Projects of Afyon

Kocatepe University', project number 18.KARİYER.171. The authors thank Afyon Kocatepe University Science

Research Projects Coordination Unit for the financial support during the laboratory works.

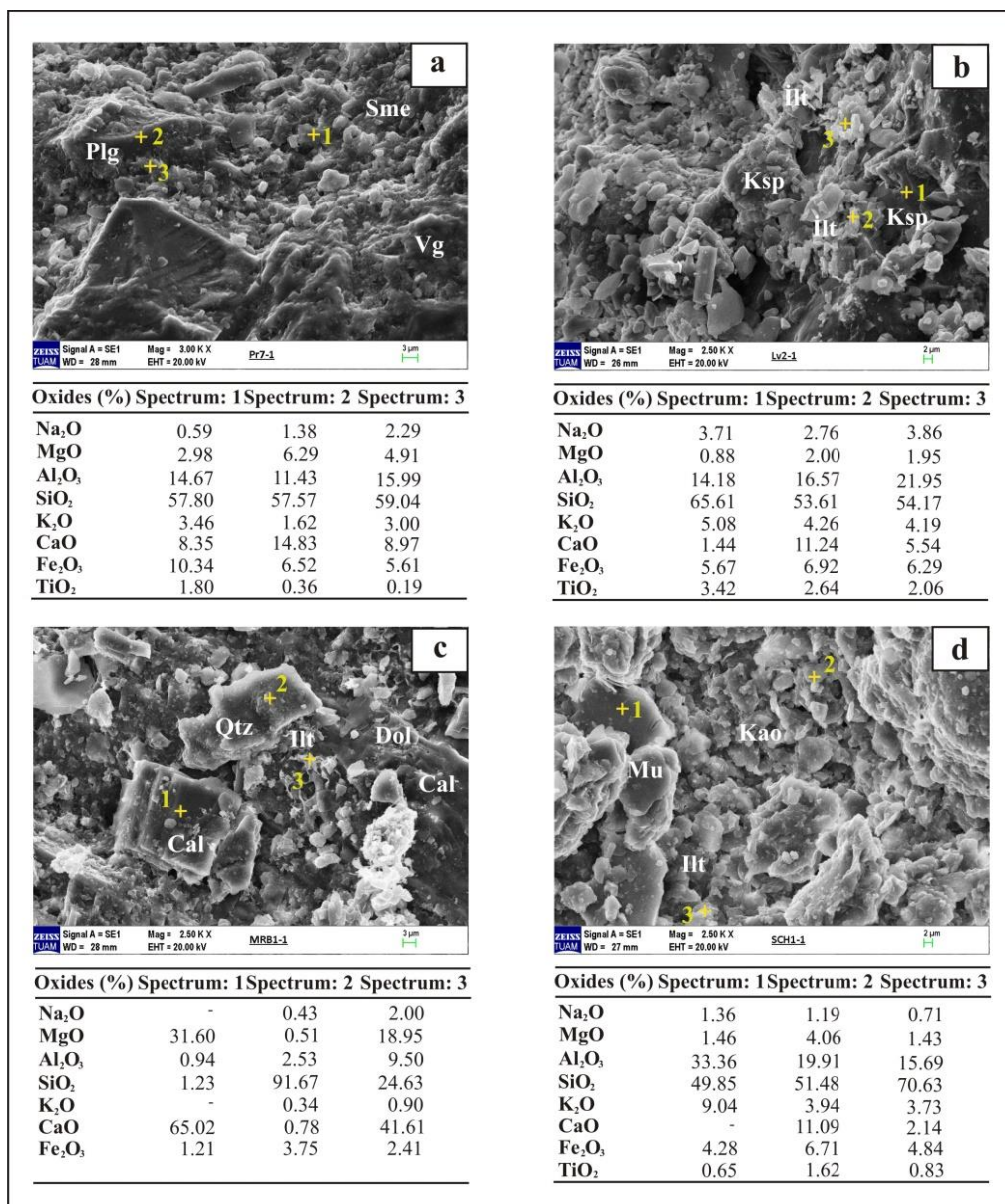


Figure 6. The semi-quantitative EDS results of alteration minerals. (Qtz): Quartz, (Ksp): Alkali feldspar, (Plg): Plagioclase, (Mu): Muscovite, (Sme): Smectite, (Ill): Illite, (Kao): Kaolinite, (Cal): Calcite, (Dol): Dolomite and (Vg): Volcanic glass.

5. References

Basel, E.D.K., Serpen, U., and Satman, A. 2009. Assesment of Turkey Geothermal Resources. *Proceedings*, 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California.

Brindley, G. W. and Brown, G., 1980. Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society, London.

Cole, T.G., 1988. The nature and the origin of smectite in the Atlantic II Deep, Red Sea. *Canadian Mineralogist*, **26**, 755–763.

Dağıştan, H., 2008. Yenilenebilir enerji ve jeotermal kaynaklarımız. *Proceedings*, Termal ve Maden Suları Konferansı Bildiriler Kitabı, 11-23, Afyonkarahisar, (In Turkish).

Dağıştan, H., 2013. Türkiye jeotermal kaynak aramaları, kullanımı ve sürdürülebilirliğinin sağlanması. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, **15**, 1-9, Ankara, (In Turkish),.

- Duysak, S., 2019. Bayatçık jeotermal alanının (Afyonkarahisar) hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal olarak incelenmesi. Msc Thesis, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 90, (In Turkish).
- Erkan, Y., Bayhan, H., Tolluoğlu, Ü.A. and Aydar, E., 1996. Afyon Yöresi Metamorfik ve Volkanik Kayaçlarının Jeolojik, Petrolojik ve Jeokimyasal İncelenmesi. – TÜBİTAK Projesi No: YBAG - 0044, 210s, Ankara, (In Turkish).
- Franzson, H. 1998. Reservoir geology of the Nesjavellir high-temperature field in SW-Iceland. *Proceedings of the 19th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference, Manila*, 13-20.
- Franzson, H., Zierenberg, R., and Schiffman, P., 2008: Chemical transport in geothermal systems in Iceland. Evidence from hydrothermal alteration, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **173**, 217-229.
- Henley, R.W., and Ellis, A.J., 1983. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth Science and Reviews*, **19**, 1-50.
- Karakaya, M., 2006. Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri. Bizim Büro Basımevi, Ankara, 656, (In Turkish).
- Kibici, Y., Yıldız, A., and Bağcı, M., 2001. Afyon kuzeyinin jeolojisi, ve mermer potansiyelinin araştırılması. *Proceedings, Türkiye III. Mermer Sempozyumu*, 73-84, Afyonkarahisar, (In Turkish).
- Lagat, J., 2010. Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria domes geothermal field, Kenya. *Proceedings, Short Course V on Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP, GDC and KenGen*, 24, Kenya.
- Mas, A., Guisseau, D., Patrier Mas P., Beaufort, D., Genter, A., Sanjuan, B., Girard J.P., 2006. Clay minerals related to the hydrothermal activity of the Bouillante geothermal field (Guadeloupe), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **158**, 380-400.
- Metin, S., Genç, S., and Bulut, V., 1987. Afyon ve yakın dolayının jeolojisi. M.T.A. Rapor No: 2113, Ankara, (In Turkish).
- Mizota, C. and Faure, K. 1998. Hydrothermal origin of smectite in volcanic ash. *Clays and Clay Minerals*, **46**, 178-182.
- Öktü, G., Kara, İ., and Önder, İ., 1997. Afyon ilinde yer alan Ömer-Gecek-Uyuz-Hamamı, Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal alanlarının detaylı etüdü. MTA derleme No:10097, 41s. Ankara (In Turkish).
- Reyes, A.G., 2000. Petrology and mineral alteration in hydrothermal systems: from diagenesis to volcanic catastrophes. UNU-GTP, Iceland, report 18-1998, 77.
- Ulutürk, Y., 2009. Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) dolayının jeolojisi ve suların kökensele yorumu. PhD Thesis, Süleyman Demirel University, Isparta, 190, (In Turkish).
- Velde, B., 1995. Geology of clays In: (Velde B (ed.) Origin and mineralogy of clays. Springer 1-5.
- Yıldız, A., Candansayar, M.E., Bağcı, M., Türker, E., Ulutürk, Y., Gökgöz, A., Erdoğan, E., Başaran, C., and Çonkar, F.E., 2011. Afyonkarahisar ilinin jeotermal potansiyelinin araştırılması. AKÜ BAPK Projesi, 146, Afyonkarahisar, (In Turkish).
- Yıldız, A., Başaran, C., Bağcı, M., and Ulutürk, Y., 2014. Afyonkarahisar ilinin Türkiye jeotermal enerji potansiyelindeki konumu üzerine güncel veriler. *Proceedings, XIth Bölgesel Kaya Mekanik Sempozyumu*, 07-09 Mayıs 2014, 73-80, Afyonkarahisar, (In Turkish).
- Yıldız, A., Başaran, C., Bağcı, M., Gümüş, A., Çonkar, F.E., Ulutürk, Y., Yalın, H.A., 2018. The Measurement of Soil Gases and Shallow Temperature for Determination of Active Faults in Geothermal Area: Case Study from Ömer-Gecek, Afyonkarahisar (West Anatolia), *Arab J. Geosci*, **11**, 175.

İnternet Kaynakları

- 1-<https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal> (01.06.2019)

Structural Evidence For Extensional Domain-Type Geothermal Play In Western Anatolia: A Case Study From Afyon-Akşehir Graben

Çağlar ÖZKAYMAK^{1-2*}, Hasan SÖZBİLİR³⁻⁴

¹ Afyon Kocatepe University, Department of Geological Engineering, Afyonkarahisar, Turkey.

² Earthquake Research and Implementation Center of Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey.

³ Dokuz Eylül University, Department of Geological Engineering, İzmir, Turkey.

⁴ Earthquake Research and Implementation Center of Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey.

Sorumlu yazar* e-posta: activetectonics@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0377-1324>

e-posta: hasan.sozbilir@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3777-4830>

Geliş Tarihi: 16.03.2020 Kabul Tarihi: 28.07.2020

Abstract

Afyon-Akşehir Graben (AAG) which consists of the southeastern part of Akşehir-Simav Fault System (ASFS) is one of the active depression areas in Western Anatolia. The western sector of the NW-SE-trending AAG is controlled by many active normal fault segments, namely Erkmen, Gecek, and Gazlıgöl Faults. Two main geothermal fields namely, Ömer-Gecek and Gazlıgöl contain reservoirs of fluid with temperatures up to 130° C, are located on the junction points of Gecek-Erkmen faults and Gazlıgöl-Yarımca faults, respectively. The area contains three unconformity bounded geological units; Mesozoic rocks of the Afyon Metamorphic Zone (reservoir unit), Miocene volcano-sedimentary succession (cover unit), including several sedimentary and volcanic units and Quaternary modern basin-fills of alluvial, fluvial and travertine deposits. This study involves use of geological mapping and structural geology methods to identify play type of geothermal fields mentioned above. Paleostress inversion analysis based on basin-bounding active faults and active extensional cracks along the travertine deposits shows that the AAG has been deformed under the control of multidirectional extension, with E-W and NE-SW to NW-SE orientations since Plio-Quaternary time. These types of extension are directly related with the linkage of cross faults that oriented at high-angle to the strike of NW-SE-trending major breakaway fault of AAG. Field-based studies also reveals that geothermal fields in AAG develops on the interactions of these active faults on the extensional domain type geothermal play without active volcanism coming to the surface.

Keywords

Afyon Akşehir Graben;
Geothermal play type;
Extensional domain;
Western Anatolia

Batı Anadolu'da Genişleme Alanı Tipi Jeotermal Ortamın Varlığına Dair Yapısal Veriler: Afyon-Akşehir Grabeni'nden Örnek Bir Çalışma

Öz

Akşehir-Simav Fay Sistemi'nin güneydoğu bölümünü temsil eden Afyon-Akşehir Grabeni (AAG), Batı Anadolu'daki aktif çöküntü alanlarından birisidir. KB-GD uzanımı AAG'nin batı bölümü Erkmen, Gecek, Gazlıgöl gibi diri normal faylar ile kontrol edilmektedir. 130° C'ye varan rezervuar su sıcaklıkları ile bu bölgedeki en önemli jeotermal sahalar olan Ömer-Gecek ve Gazlıgöl Jeotermal sahaları sırasıyla Gecek ve Erkmen Fayları ile Gazlıgöl ve Yarımca faylarının kesişim alanlarında yer almaktadır. Bölgede yüzlek veren jeolojik birimler, birbirlerinden uyumsuzlukla ayrılan Afyon Metamorfik Zonu'na ait Mesozoik kayaçlar (rezervuar birim), Miyosen yaşlı volkano-sedimanter ve volkanik birimler (örtü birimi) ile Kuvaterner yaşlı alüvyal-flüvyal ve travertenlerden oluşan modern havza dolgularından oluşmaktadır. Bu çalışma, yukarıda bahsedilen jeotermal sahaların ortam tipini, jeolojik haritalama ve yapısal jeoloji gibi saha çalışmalarını içeren metodlar kullanılarak tanımlamayı amaçlamaktadır. Havzayı sınırlayan fay düzlemleri üzerinde yapılan paleostres analizleri ve faylar üzerinde ölçülen güncel açılma çatlakları, AAG'nin Pliyo-Kuvaterner'den beri, D-B ve KD-GB'dan KB-GD yönüne kadar değişiklik gösteren çok yönlü genişlemeli tektonizma etkisinde şekillendiğine işaret etmektedir. Genişleme tipi, AAG'nin KB-GD uzanımlı ana graben fayı ile bu faya yüksek açılı uzanan çapraz fayların bağlantıları ile ilişkilidir. Arazi

Anahtar kelimeler

Afyon Akşehir Grabeni;
Jeotermal ortam;
Genişleme alanı; Batı
Anadolu

bazlı çalışmalar, AAG içerisindeki jeotermal sahaların yüzeye gelmiş aktif volkanizma olmaksızın diri fayların kesişim noktalarında gelişen genişleme alanı tipi jeotermal ortamlara işaret ettiğini göstermektedir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

The neotectonic structures of Anatolia have been shaped by deformation model which is affected by the westward tectonic escape of the Anatolian block, core complex formation, subduction related slab edge processes and backarc spreading as a result of collision between African, Arabian and Eurasian plates, in the Aegean region (Figure 1a) (e.g. Dewey and Sengör, 1979; Şengör et al., 1985; Bozkurt, 2001; Biryol et al., 2011). As a result, the Western Anatolian Extensional Province (WAEP), is currently experiencing an approximately N–S continental extension and contains major depression areas with geothermal potentials such as Gediz, Büyük Menderes, Denizli and Afyon-Akşehir grabens (Dewey and Şengör 1979; Şengör and Yılmaz 1981; Şengör et al., 1985; Seyitoğlu and Scott 1991; Yılmaz et al., 2000; Bozkurt 2001; Sözbilir 2005; Özkaymak et al., 2013, Figure 1b). Extensional domain type geothermal plays such as Western Turkey are dominantly controlled by fault or fault-leakage (Moeck, 2014). Because convection or fluid circulations occurs along these faults, geometry and stress modelling of the faults are essential in order to exploration for geothermal potentials. On the other hand, although some geological circumstances such as reservoir temperature, enthalpy, hydrogeology and exergy of these geothermal fields have been well analyzed in WAEP (e.g. Şimşek, 2003; Gemici and Tarcan, 2003; Öztürk et al., 2007; Erkan, 2015; Mertoğlu et al., 2015), the studies on structural controls and geothermal play types of them are quite rare (e.g. Şimşek, 1997; Pfister et al., 1998; Faulds et al., 2009).

Akşehir-Simav Fault System (ASFS) is one of the most active neotectonics structures in the WAEP and contains many geothermal fields between Iğın and Balıkesir cities (Figure 1). Some of them are

located in WNW-ESE-trending and approximately 150-km-long Afyon-Akşehir Graben (AAG) which represent the southeastern part of the ASFS.

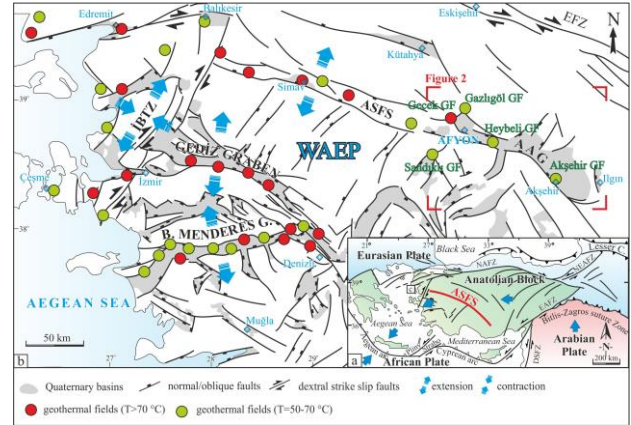


Figure 1. a) Tectonic outline of the eastern Mediterranean area (compiled from Özkaymak, 2015). Abbreviations: ASFS, Akşehir-Simav Fault System; DSFZ, Dead Sea Fault Zone; EAFZ, East Anatolian Fault Zone; NAFZ, North Anatolian Fault Zone; NEAFZ, Northeast Anatolian Fault Zone. b) Simplified map showing the major active basins and geothermal fields in western Anatolia (compiled from Faulds et al., 2009; Özkaymak, 2015; Mertoğlu et al., 2015). Abbreviations: İBTZ: İzmir-Balıkesir Transfer Zone; AAG: Afyon-Akşehir Graben; WAEP: West Anatolian Extensional Province; EFZ: Eskişehir Fault Zone

Gazlıgöl, Ömer-Gecek, Heybeli and Akşehir geothermal fields have the most known geothermal springs. Gazlıgöl and Ömer-Gecek geothermal fields are located in the Afyon Basin (northwestern part of the AAG) and contain reservoirs of water with maximum temperatures of 70°C and 130°C, respectively. Geothermal well location and temperature data are taken from Afyon Geothermal Facilities Tourism Ind. Trade Incorporated Business (AFJET). This study presents new field evidence, including geologic mapping, geomorphologic and

structural analysis of the Gazlıgöl and Ömer-Gecek geothermal fields, to evaluate structural features of their geothermal play types.

2. Geological Setting

2.1. Geology of the Study Area

Afyon-Akşehir Graben is an approximately 150 km long, 4-20 km wide NW-SE-trending active depression which is controlled by a numerous active dip/oblique slip normal fault segments (Koçyiğit, 1984; Koçyiğit et al., 2000; Emre et al., 2011; Özkaymak et al., 2017 and 2019). The length of these faults range from 8 to 29 km, with an average length of about 15 km (Duman et al., 2018; Emre et al., 2018). The historical and instrumental earthquake records indicate the existence of large number of earthquakes that created surface ruptures in this system. The latest one occurred on the Sultandağı Fault with a magnitude of 6.3 (03 February 2002) and caused a 26-km-long surface rupture in the middle part of the graben (Figure 2) (Yürür et al., 2002; Tan et al., 2008).

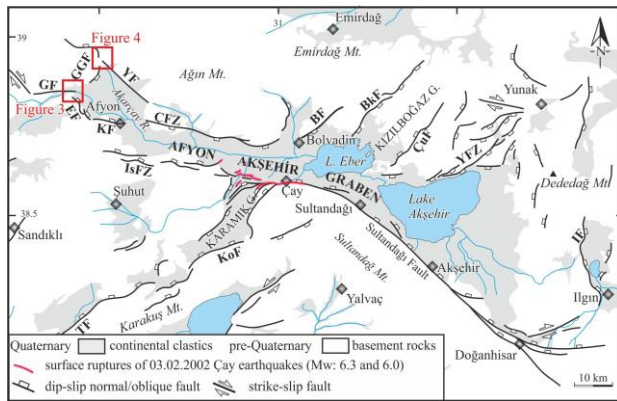


Figure 2. The active fault map of study area (compiled from Emre et al. 2011; Özkaymak et al. 2017) Abbreviations: GF: Gecek Fault; GGF: Gazlıgöl Fault; EF: Erkmen Fault; YF: Yarımca Fault; KF: Karahisar Fault; ÇFZ: Çobanlar Fault Zone; İSFZ: Işıklar Fault Zone; BF: Bolvadin Fault; BkF: Büyük Karabağ Fault; ÇuF: Çukurcak Fault; YFZ: Yunak Fault Zone; IF: Ilgın Fault; KoF: Kocbeyli Fault; TF: Tatarlı Fault.

The western sector of the AAG is controlled by active normal faults, namely Erkmen Fault, Gecek Fault, Gazlıgöl Fault, Karahisar Fault and Yarımca Fault. Gazlıgöl and Ömer-Gecek Geothermal fields

are located in the western part of the graben, where the Holocene deposits and basement rocks are tectonically juxtaposed along the mountain fronts.

2.2. Ömer-Gecek Geothermal Field

Basement rocks in the study area are represented by rocks of Afyon Zone which was metamorphosed under blueschist facies conditions during late Cretaceous and early Cenozoic times (Candan et al., 2005; Pourteau et al., 2010 and 2013). The unit is composed of moderately folded and jointed schist and marbles with quartzite veins. Metamorphic rocks of the Afyon Zone are unconformably overlain by the Miocene-Pliocene sequence which starts with the terrestrial deposits representing the polygenic conglomerate and mudstone alternation. Then, grades upward into volcano-sedimentary deposits comprising of whitish-grey tuffite and agglomerate clasts. On top of this unit is composed of trachy-andesitic lava and volcanoclastic rocks, consisting tuff and agglomerate. The thickness of lava varies between 80 and 100 m (Yıldız et al., 2010). The Afyon Volcanics were previously dated by Ar/Ar method yielding age ranging from 15.5 to 8.6 Ma (Prelevic et al., 2012; Akal et al., 2013). The uppermost part of the succession is represented by cream-beige coloured silicic and clay altered limestone. The sequence is unconformably overlain by the Quaternary modern basin fills consisting of alluvial, colluvial, fluvial and travertine deposits.

Ömer-Gecek geothermal field is located in the northwestern part of the Afyon Basin consisting of four geothermal springs, namely, Ömer, Gecek, Uyuz and Kızık springs. Structures shaping the northwestern side of basin have dominantly dip-slip normal fault character. Several NNW-SSE and NNE-SSW-trending dip-slip normal faults which cut mostly the basement rocks were mapped in the field (Figure 3). These faults also represent the structural contact between Miocene-Pliocene sequence and the pre-Neogene basement rocks to the north. The northern boundary of the Afyon Basin is represented by NE-SW-trending and southeast dipping Gecek fault. Slip lines with an average rake of 78°E indicate the normal behaviour on the E-W-

striking fault planes on site 1 (Figure 3). Along the boundary fault, Miocene-Pliocene terrestrial sediments and recent alluvial are juxtaposed. A few northwest dipping normal fault segments cut Quaternary travertines and forms step-like geometry around Uyuz spring (Figure 3).

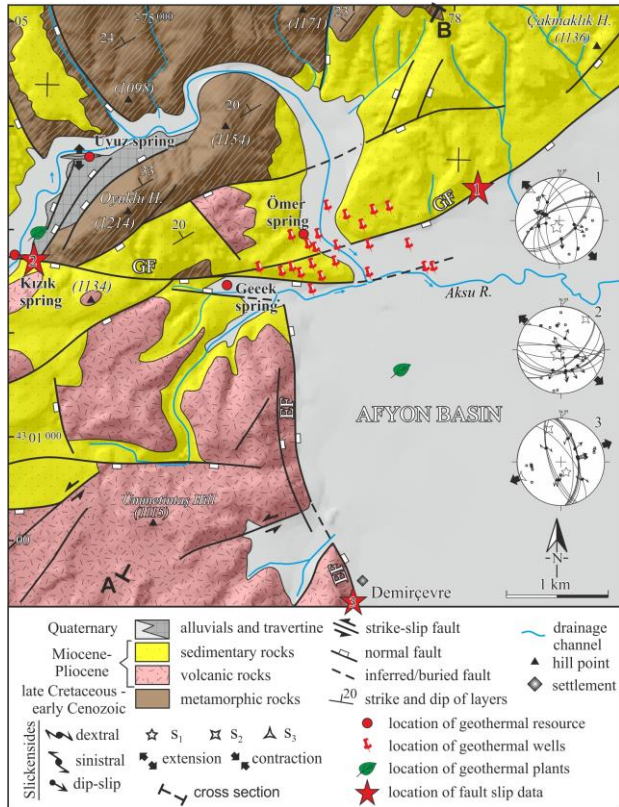


Figure 3. Detailed geologic map of the Ömer-Gecek geothermal field. Note that the results of kinematic analysis of faults are shown on eastern side of the figure. Geothermal well location and temperature data are taken from Afyon Geothermal Facilities Tourism Ind. Trade Incorporated Business (AFJET). Abbreviations: GF: Gecek Fault; EF: Erkmen Fault

Here, E-W-trending fissure-ridge-type travertine formations are exposed on the basinward fault splay. Western border of the Afyon Basin is controlled by a NNE-SSW-trending and east dipping Erkmen Fault which exhibits well preserved slip surfaces indicating N5°W striking normal faulting with a rake of 86° at the site 3. Around Demirçevre town, volcanic rocks cover wide areas on the footwall of the Erkmen Fault while hangingwall is made up of alluvial fluvial sediments. Gecek spring is located on the junction of Erkmen and Gecek

faults at the northwestern corner of the Afyon Basin.

2.3. Gazlıgöl Geothermal Field

Gazlıgöl geothermal field is located in the northeastern part of the Afyon Basin. Many fault splays were mapped both N-S and NW-SE associated with two different fault zones, namely Gazlıgöl and Yarımca faults which merge in the Gazlıgöl urban area (Figure 4).

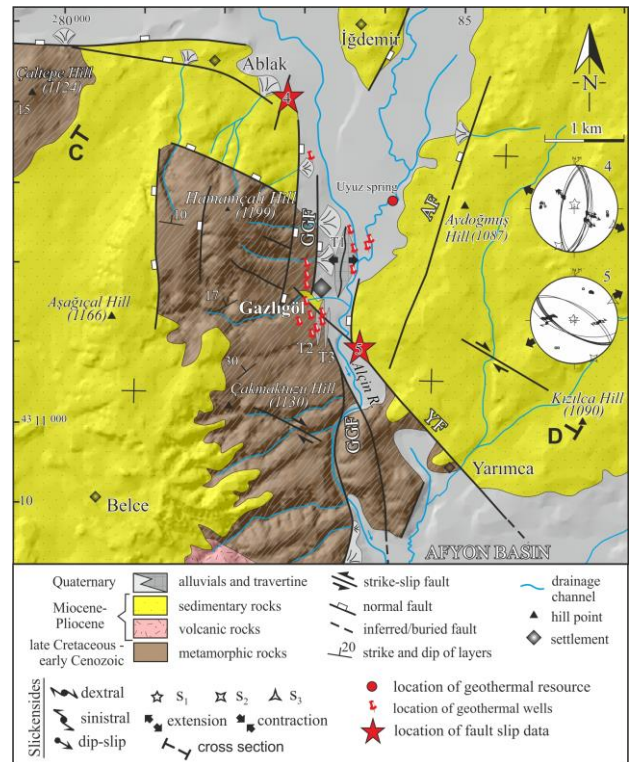


Figure 4. Detailed geologic map with kinematic analysis results of the Gazlıgöl geothermal field. Geothermal well location and temperature data are taken from Afyon Geothermal Facilities Tourism Ind. Trade Incorporated Business (AFJET). Abbreviations: GGF: Gazlıgöl Fault; YF: Yarımca Fault; AF: Aydoğmuş Fault.

These faults also control the northeast border of Afyon Basin. Field studies show that Gazlıgöl Fault bifurcated and cuts the metamorphic basement rocks to the south of the study area. Around the Gazlıgöl city center, N-S directed mountain front exhibits prominent linearity and well-developed alluvial fan deposits. Some well-preserved fault planes are exposed in a road cut, in the north of the

study area and show fault planes dipping in the range of 56°–67° with rakes of 70°–75°. The basin-bounding Yarımca Fault exhibits well preserved slip data indicating N50°W striking oblique faulting with a rake of 50° indicating both normal and dextral slip component at the site 5. The Yarımca Fault also bordered the Miocene-Pliocene sediments. In the study area, Alçın river flows on the N-S-directed structural corridor in a south direction towards to the Afyon Basin. Two geological cross section were measured in the field in order to show geological setting including fault geometry, heat source, heat migration pathway, reservoir and cover units (Figure 5).

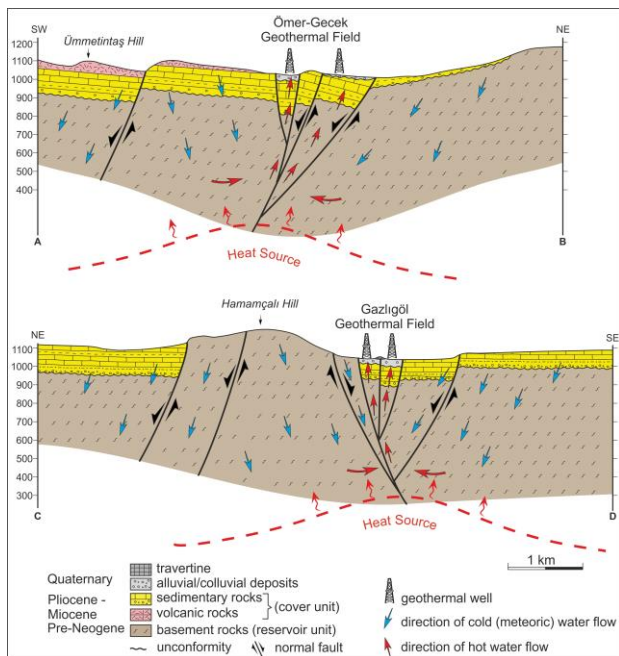


Figure 5. Geologic cross section showing stratigraphic and structural relationships of fault-controlled geothermal fields in Afyon Basin. See Figs. 3 and 4 for the location of cross sections.

Three N-S-trending fissure-ridge-type travertine formations are exposed along these faults. The longest ridge (T1, Figure 4) is about 1 km and mapped in the northeast of the city center while others (T2 and T3) are about 500 m long outcropping in the southern part of the city center. T2 and T3 are cut and displaced by Yarımca Fault. Laterally offset is up to about 20 meters along the fault, providing strong evidence for right lateral displacement. Normal character of Yarımca Fault with a right lateral component of motion is also

evidenced by measuring the fault-slip data (see, the section 2.3). Vertical veins in central part of the ridge can be seen along the T1 in N-S direction. Compound veins of up to 50 cm wide are also measured in the central part (Figure 6).

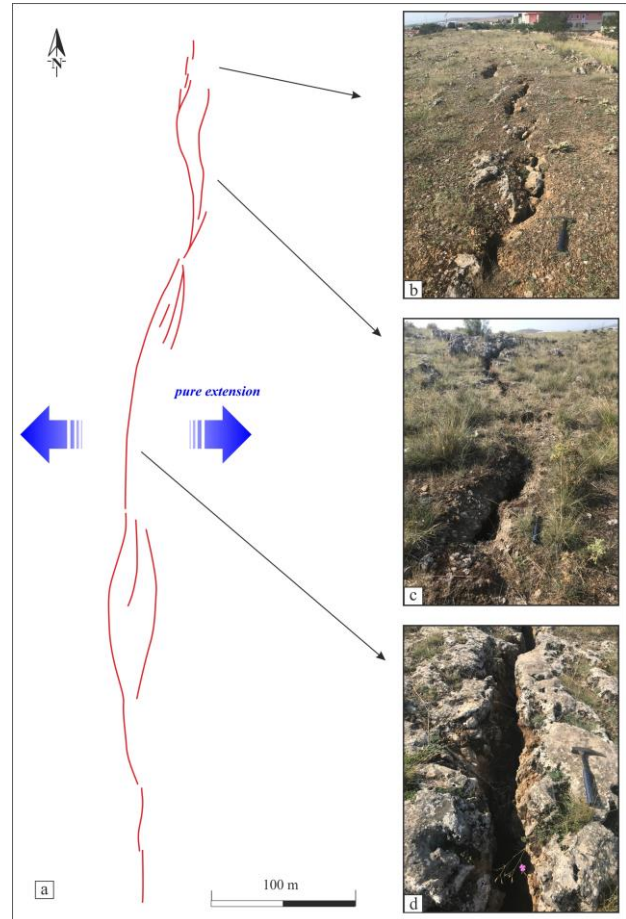


Figure 6. a) Extensional crack geometry of the Gazlıgöl Travertine (T1, see, Figure 3 for the location). b,c,d) Field photographs of the crack.

Extensional fractures on ridge show bifurcating pattern and are mostly left stepping. Measured strikes are in between N15°W and N15°E while the average strike is N-S.

2.4. Kinematic Analysis of Fault-slip Data

During the field studies, we have studied the stress field orientations of mapped faults in order to determine the kinematic framework of faulting in Afyon Basin. Five locations were identified where the sense of Quaternary slip along brittle faults can be determined. The sense of movement along the faults was deduced from kinematic indicators,

including displaced marker horizons, right-stepping, riedel shears and corrugations. Fault-slip data were analyzed using the stress inversion method of Angelier (1984, 1991, 1994), and then computed using software developed by Hardcastle and Hills (1991). Four components of the reduced stress tensor were extracted from the fault-slip data: the directions of the three principal stresses ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) and the relative magnitudes for the principal stress axes, expressed by the axial ratio $\varphi = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\sigma_3 - \sigma_1)$, with $0 < \varphi < 1$ (Angelier, 1994). The stress regime is determined by the nature of the vertical stresses: extensional when σ_1 is vertical, strike-slip when σ_2 is vertical and compressional when σ_3 is vertical. Delvaux et al. (1997) suggested that the stress regimes also vary by function of the stress ratio, which ranges from 0 to 1: radial extension (σ_1 vertical, $0 < \varphi < .25$), pure extension (σ_1 vertical, $.25 < \varphi < .75$), transtension (σ_1 vertical, $.75 < \varphi < 1$ or σ_2 vertical, $1 > \varphi > .75$), pure strike-slip (σ_2 vertical, $.75 > \varphi > .25$), transpression (σ_2 vertical, $.25 > \varphi > 0$ or σ_3 vertical, $0 < \varphi < .25$), pure compression (σ_3 vertical, $.25 < \varphi < .75$) and radial compression (σ_3 vertical, $.75 < \varphi < 1$).

The computed results of fault slip measurements along the Gecek Fault define steeply plunging σ_1 axes (77° and 79°), but gently plunging σ_2 axes (11° and 12°) and σ_3 axes (06° and 00°) at site 1 and 2. The results suggest that the normal faulting is consistent with a NW–SE pure extensional stress regime ($\varphi = 0,254–0,304$) (Figure 3 and Table 1). Site 3, comprising 10 fault-slip measurements from Erkmen Fault indicate a NE–SW pure extensional tectonic regime. The calculated principles stress axes, σ_1 , σ_2 , and σ_3 have attitudes $153^\circ/68^\circ$, $340^\circ/22^\circ$ and $249^\circ/22^\circ$, respectively. The computed results of fault slip measurements along the Gazlıgöl Fault (site no:4) (Figure 4 and Table 1) define relatively steeply dipping σ_1 , plunging at 81° , whereas the σ_2 and σ_3 axes are almost horizontal plunging at 09° and 02° . The stress field orientations along the Gazlıgöl fault suggest an approximately NW–SE-directed extension. Along the strike of Yarımca Fault, the computed results define an approximately vertical σ_1 plunging at 87° and almost horizontal σ_2 and σ_3 axes, plunging at 03° and 00° . The result suggests a NE–SW pure extension (Figure 4 and Table 1).

Table 1. Results of paleostress analysis from measurements of slickensides in the study area (see Figure 3 and 4 for locations which are showed as red filled stars). Abbreviations: Max ANG: Maximum misfit angle.

no	nature of fault	fault name	σ_1	σ_2	σ_3	φ	Max ANG	Stress regime
1	normal-slip	Gecek	202/77	048/12	317/06	0,304	12	Pure extension
2	normal-slip	Gecek	219/79	039/11	309/00	0,254	22	Pure extension
3	normal-slip	Erkmen	153/68	340/22	249/02	0,655	10	Pure extension
4	normal-slip	Gazlıgöl	007/81	203/09	112/02	0.552	13	Pure extension
5	oblique-slip	Yarımca	326/87	153/03	063/00	0.708	06	Pure extension

3. Discussion and Conclusion

Active extensional tectonic in Afyon Basin is documented by field-based studies including geological mapping, geomorphologic and structural analysis of graben bounding faults to identify structural features of play type of geothermal fields. Mapping studies clearly indicate that structures shaping the northwestern side of the Afyon Basin have dominantly dip-slip normal fault character. These active faults also responsible for the graben formation. Besides this,

the computed results of fault slip measurements along the graben bounding faults suggest NE–SW and NW–SE-directed pure extension. On the other hand, fissure-ridge-type travertine formations on Gecek and Gazlıgöl Faults prove the existence of N–S and E–W directed extensional tectonics, respectively. These results indicate the multidirectional extension stress field in N–S, E–W, NE–SW and NW–SE directions in Afyon Basin have been formed since Plio-Quaternary time. Multidirectional extensional regime in western Anatolia has been subject of many studies (e.g.

Bozkurt and Mittwede, 2005; Bozkurt and Sözbilir, 2006; Rojay et al., 2012; Özkaymak et al., 2017; Özkaptan et al., 2018). Such type of extension is attributed to stress permutations between σ_2 and σ_3 in transfer zones in southwestern Anatolia by Bozkurt and Sözbilir (2006). The computed results of fault slip measurements in Afyon Basin also shows scattered patterns of σ_2 and σ_3 (Table 1). According to this study, these type of extension are directly related with the linkage of cross faults (Figure 5 and 7) that oriented at high-angle to the strike of NW-SE-trending major breakaway fault of AAG. Field-based studies reveal that geothermal fields in AAG develops on the interactions of these active faults on the extensional domain type geothermal play without active volcanism coming to the surface. Similar tectonic models are also proposed for Kızıldere (Turkey), Bradys (Nevada/USA), Souz-sous-Forets (France), Olkaria (Kenya) geothermal fields (Moeck et al., 2014). Fault intersections between several normal faults in AAG cause to highly fractured rocks by connecting the structures and cause the suitable environment to fluids flow (Figure 7).

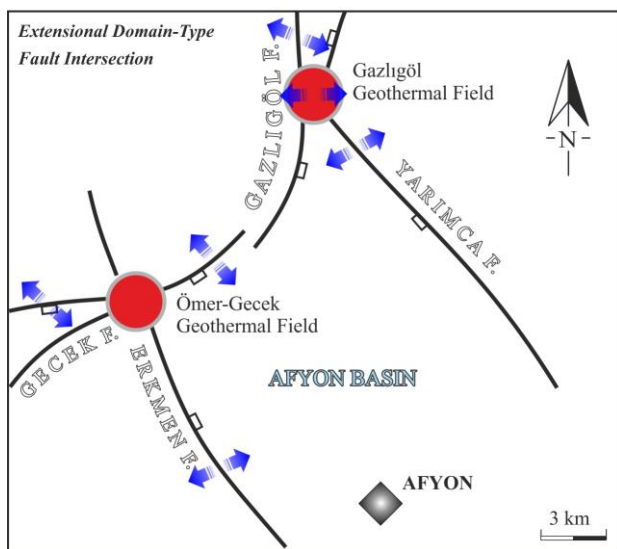


Figure 7. Structural setting of geothermal play for Gazlıgöl and Ömer-Gecek geothermal fields

Acknowledgments

This study is supported by Afyon Kocatepe University Scientific Research (BAP) Project of 18.KARIYER.189 and 17.KARIYER.207. We are

grateful to Arda Özkaymak and Mertkan Osman Geçievi for their helps during the field studies.

4. References

- Akal, C., Helvacı, C., Prelević D. and van Den Bogaard, P., 2013. High-K volcanism in the Afyon region, western Turkey: from Si-oversaturated to Si-undersaturated volcanism. *International Journal of Earth Sciences*, **102** (2), 435-453.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 5835–5848.
- Angelier, J., 1991. Inversion of field data in fault tectonics to obtain regional stress. III: A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, **103**, 363–376.
- Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction, In P. L. Hancock (Ed.), *Continental deformation*, Oxford: Pergamon Press ,53–100.
- Biryol, C.B., Beck, S.L., Zandt, G. and Özacar, A.A., 2011. Segmented African lithosphere beneath the Anatolian region inferred from teleseismic P-wave tomography. *Geophysical Journal International*, **184**, 1037–1057.
- Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey–A synthesis. *Geodinamica acta*, **14** (1–3), 3-30.
- Bozkurt, E. and Mittwede, S.K., 2005. Introduction: Evolution of continental extensional tectonics of western Turkey. *Geodinamica Acta* **18** (3-4) 153–165.
- Bozkurt, E. and Sözbilir, H., 2006. Evolution of the large-scale active Manisa Fault, southwest Turkey: Implications on fault development ve regional tectonics. *Geodinamica Acta*, **19** (6), 427–453.
- Candan, O., Çetinkaplan, M., Oberhansli, R., Rimmel, G. and Akal, C., 2005. Alpine high-

- P/low-T metamorphism of the Afyon Zone and implications for the metamorphic evolution of Western Anatolia, Turkey. *Lithos*, **84**, 102-124.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. and Sankov, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia Part II: Cenozoic rifting. In S. Cloetingh, M. Fernandez, J. A. Munoz, W. Sassi, and F. Horvath (Eds.), Structural controls on sedimentary basin formation, *Tectonophysics*, **282**, 1–38.
- Dewey, J. F., and Şengör, A. M. C., 1979. Aegean and surrounding regions: Complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, **90**, 84-92.
- Duman, T.Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadrioğlu, F.T., Başarır, Baştürk, N., Kılıç, T., Arslan, S., Özalp, S., Kartal, R.F., Kalafat, D., Karakaya, F., Eroğlu, Azak, T., Özel, N.M., Ergintav, S., Akkar, S., Altınok, Y., Tekin, S., Cingöz, A. and Kurt, A.İ., 2018. Seismotectonics database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16 (8)**, 3277-3316.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Olgun, Ş. and Elmacı, H., 2011. 1:250.000 scale active fault map series of Turkey, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle, Serial number: 16, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. and Çan, T., 2018. Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16 (8)**, 3229-3275.
- Erkan, K., 2015. Geothermal investigations in western Anatolia using equilibrium temperatures from shallow boreholes. *Solid Earth*, **6**, 103–113.
- Faulds, J.E., Bouchot, V., Moeck, I., and Oğuz, K., 2009. Structural controls of geothermal systems in western Turkey: A preliminary report. *Geothermal Resources Council Transactions*, **33**, 375-383.
- Gemici, U. and Tarcan, G., 2003. Hydrogeochemistry of the Simav geothermal field, western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **116 (3-4)**, 215-233.
- Hardcastle, K. C. and Hills, L. S., 1991. BRUTE3 and SELECT: Quick Basic 4 programmes for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous populations of fault slip data. *Computers and Geosciences*, **17**, 23–43.
- Koçyiğit, A., 1984. Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, **27 (1)**, 1- 15 (in Turkish).
- Koçyiğit, A., Ünay, E. and Saraç, G., 2000. Episodic graben formation and extensional neotectonics regime in west Central Anatolia and the Isparta Angle: a case study in the Akşehir-Afyon Graben, Turkey. *Geological Society of London Special Publication*, **173**, 405-421.
- Mertoğlu, O., Simsek, S., and Başarır, N., 2015. Geothermal Energy Use, Country Update for Turkey. Proceedings, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 1-10.
- Moeck, I.S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **37**, 867-882.
- Özkaptan, M., Kaymakçı, N., Langereis, C. G., Gülyüz, E., Özacar, A. A., Uzel, B., and Sözbilir, H., 2018. Age and kinematics of the Burdur Basin: Inferences for the existence of the Fethiye Burdur Fault Zone in SW Anatolia (Turkey). *Tectonophysics*, **744**, 256-274.
- Özkaymak, Ç., 2015. Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional

- implications. *Geodinamica Acta*, **27 (2-3)**, 110-129.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., and Uzel, B., 2013. Neogene-Quaternary evolution of the Manisa Basin: Evidence for variation in the stress pattern of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone, western Anatolia. *Journal of Geodynamics*, **65**, 117–135.
- Özkaymak Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ. and Baybura, T., 2017. Geologic, Geomorphologic and Geodetic Analyses of Surface Deformations Observed in Bolvadin (Afyon-Akşehir Graben, Afyon). *Geological Bulletin of Turkey*, **60**, 169-188.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Geçievi, M.O. and Tiryakioğlu, İ., 2019. Late Holocene coseismic rupture and aseismic creep on the Bolvadin Fault, Afyon Akşehir Graben, Western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Science*, **28**, 787-804.
- Öztürk, H.K., Atalay, Ö., Yılandı, A. and Hepbaşlı, A., 2007. Energy and Exergy Analysis of Kizildere Geothermal Power Plant, Turkey. *Energy Sources*, Part A, **28 (15)**, 1415-1424.
- Pfister, M., Rybach, L., and Şimşek, S., 1998. Geothermal reconnaissance of the Marmara Sea region (NW Turkey); surface heat flow density in an area of active continental extension. *Tectonophysics*, **291 (1-4)**, 77-89.
- Pourteau, A., Candan, O. and Oberhänsli, R., 2010. High-Pressure metasediments in central Turkey: constraints on the Neotethyan closure history. *Tectonics*, **29**, TC5004.
- Pourteau, A., Sudo, M., Candan, O., Lanari, P., Vidal, O. and Oberhänsli, R., 2013. Neotethys closure history of Anatolia: insight from 40Ar–39Ar geochronology and P–T estimation in high-pressure metasediments. *Journal of Metamorphic Geology*, **31**, 585-606.
- Prelević D., Akal, C., Foley, S.F., Romer, R.L., Stracke, A. and van Den Bogaard, P., 2012. Ultrapotassic mafic rocks as geochemical proxies for postcollisional mantle dynamics of lithosphere: the case of SW Anatolia-Turkey. *Journal of Petrol*, **53**, 1019–1055.
- Rojay, B., Toprak, V., Demirci, C. and Süzen, L., 2005. Plio-Quaternary evolution of the Küçük Menderes Graben (Southwestern Anatolia, Turkey). *Geodinamica Acta*, **18**, 317-331.
- Seyitoğlu, G. and Scott, B., 1991. Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, **128**, 155–166.
- Sözbilir, H., 2005. Oligo–Miocene extension in the Lycian orogen: evidence from the Lycian molasse basin, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, **18**, 257-284.
- Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach, *Tectonophysics*, **75**, 181-241.
- Şengör, A. M. C., Görür, N., and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In K. T. Biddle and N. Christie-Black (Eds.), *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation Tulsa, Oklahoma. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, **37**, 227-264
- Şimşek, S., 1997. Geothermal potential in northwestern Turkey, *Active Tectonics of Northwestern Anatolia. The Marmara Poly-Project* (Edited by Schindler, C., and Pfister, M., 1997), vdf hochschulverlag AG ander ETH, Zurich, 111-123
- Şimşek, S., 2003. Hydrogeological and isotopic survey of geothermal fields in the Büyük Menderes Graben, Turkey. *Geothermics*, **32 (4-6)**, 669-678.
- Tan, O., Tapırdamaz, M. C., and Yörük, A., 2008. The earthquakes catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **17**, 405-418.
- Yılmaz, Y., Genç, S.C., Gürer, O.F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, R. and

Elmas, A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop? In: Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A. (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society of London Special Publications*, **173**, 353-384.

Yıldız, A., Kuşcu, M., Dumlupınar, İ., Arıtan, E. and Bağcı, M., 2010. The determination of the mineralogical alteration index and the investigation of the efficiency of the hydrothermal alteration on physico-mechanical properties in volcanic rocks from Köprülü, Afyonkarahisar, West Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **69**, 51-61.

Yürür, T., Köse, O., Demirbağ, H., Özkaymak, Ç. and Selçuk, L., 2003. Could the coseismic fractures of a lake ice reflect the earthquake mechanism? (Afyon earthquakes of 3 February 2002, Central Anatolia, Turkey). *Geodinamica Acta*, **16**, 83-87.

Araştırma Makalesi / Research Article

Balıca (Elazığ Güneyi, Doğu Anadolu) Civarındaki Denizel Sedimanter Kayaçların Jeokimyasal ÖzellikleriDicle BAL AKKOCA¹, Gizem ÇETİNTAŞ²¹⁻² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ElazığSorumlu yazar e-posta: dbal@firat.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3279-8443>e-posta: gcetintas@hotmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0745-0912>

Geliş Tarihi: 07.11.2019

Kabul Tarihi: 31.08.2020

Öz

Bu çalışmada Elazığ İli'nin yaklaşık 12 km güneyinde Balıca Köyü civarında denizel ortamda çökelmiş olan Orta Eosen-Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu'nun ince taneli sedimanlarından alınan örneklerin jeokimyasal özellikleri belirlenmiş, böylece kaynak alandaki ayrışma derecesi, kaynak kayanın bileşimi ve tektonik özelliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Balıca civarında Kırkgeçit Formasyonu yer yer çok ince taneli kumtaşları aralanmasından oluşan karbonatca zengin boz-gri renkli çamurtaşlarından oluşmaktadır. Log (SiO₂/Al₂O₃)'e karşı log (Fe₂O₃/K₂O) oranına göre örnekler Fe'ce zengin şeyl alanına düşmektedir. Ortalama kimyasal alterasyon indeksi (CIA) ve kimyasal ayrışma indeksi (CIW) değerlerine göre bu sedimanların orta dereceli alterasyona uğradığı tespit edilmiştir. Kondrit normalize diyagramlarda Balıca örnekleri bileşimi çevre kayaçlardan Elazığ Magmatitleri'ne yakın değerler sunmuştur. Balıca örnekleri bileşiminin Post Avusturalya Arkeen Şeyllerin'den (PAAS) farklı olması bunların nötr, bazik karakter sunduğunu göstermektedir. Eu/Eu* - Th/Sc oranlarına göre Kırkgeçit sedimanlarını besleyen kaynak kayaçlar bazik karakterlidir. Th/Co - La/Sc diyagramında örnekler bazik kayaçlarla silisik kayaçlar arasında yer almaktadır. La-Th-Sc üçgen diyagramı da örneklerin bileşiminin PAAS ve granitten farklı ve andezit ve bazalt aralığında olduğunu göstermiştir. La-Sc-Th, Th-Sc-Zr/10 diyagramlarına göre örneklerin bileşimi okyanusal ada yayı alanına düşmektedir.

Anahtar Kelimeler

Jeokimya; Kırkgeçit Formasyonu; Alterasyon; Tektonik Ortam; Elazığ

Geochemical Properties of the Marine Sediments Around the Balıca (Southern Elazığ)**Abstract**

In this study, the geochemical characteristics of the samples collected from the fine grain sediments of the Middle Eocene-Oligocene Kırkgeçit Formation which is deposited in marine environment were studied, In these way, it was aimed to investigate the degree of chemical weathering, and tectonic setting of the source rocks, around Balıca Village which is located nearly 12 km south of the Elazığ Province. The Kırkgeçit Formation around Balıca consists of carbonate-rich gray-gray colored mudstones which are composed of very fine-grained sandstones alternation. In the log (SiO₂/Al₂O₃) vs log (Fe₂O₃/K₂O) diagram the samples are clustered in the Fe-shale. Chemical index of alteration (CIA) and chemical index of weathering (CIW) of the sediments suggested that the intensity of weathering in the source area was moderate weathering. Chondrite-normalized patterns show that the compounds of Balıca samples are similar to Elazığ Magmatites. The fact that the Balıca samples different from the Post Australian Arkeen Shales (PAAS) shows that they presents a neutral, basic character. According to the Eu / Eu * - Th / Sc ratios, the source rocks feeding the Kırkgeçit sediments

Keywords

Geochemistry; Kırkgeçit Formation; Alteration; Tectonic Environment; Elazığ

are of basic character. In the Th / Co - La / Sc diagram samples are between the basic and silicic rocks. The La-Th-Sc triangle diagram also showed that the samples are different from PAAS and granite, and were in the range of andesite and basalt in composition. According to the La-Sc-Th, Th-Sc-Zr/10 diagrams, composition of the samples fall into the oceanic island arc area.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Sedimanların bazı major, iz ve nadir toprak elementlerini incelemeye yönelik önemli çalışmalar ulusal ve uluslararası literatürde mevcut olup, bu çalışmalarda sedimanların kaynak kayacı, bu kayaçların alterasyon derecesi ve kaynak kayaçların olduğu tektonik yerleşimi ortaya çıkarılmıştır (Armstrong-Altrin vd. 2004, Alizai vd. 2012, Tao vd. 2013, Armstrong-Altrin 2015, Garzanti vd. 2016). Na, K, Ca, Al gibi major oksitlerden faydalınalarak kullanılan indeksler ile sedimanların ve bunların kaynak kayacınının alterasyon derecesi belirlenebilmektedir (Nesbit ve Young 1982). Sedimanter süreçlerden en az etkilenen elementler olması dolayısıyla nadir toprak elementleri (NTE), Zr, Hf, Yb, Th gibi bazı elementler sedimanların kaynak kayacını ve tektonik ortamını tayin etmede yaygın olarak kullanılmaktadır (Condie vd. 2001, Armstrong-Altrin, 2015).

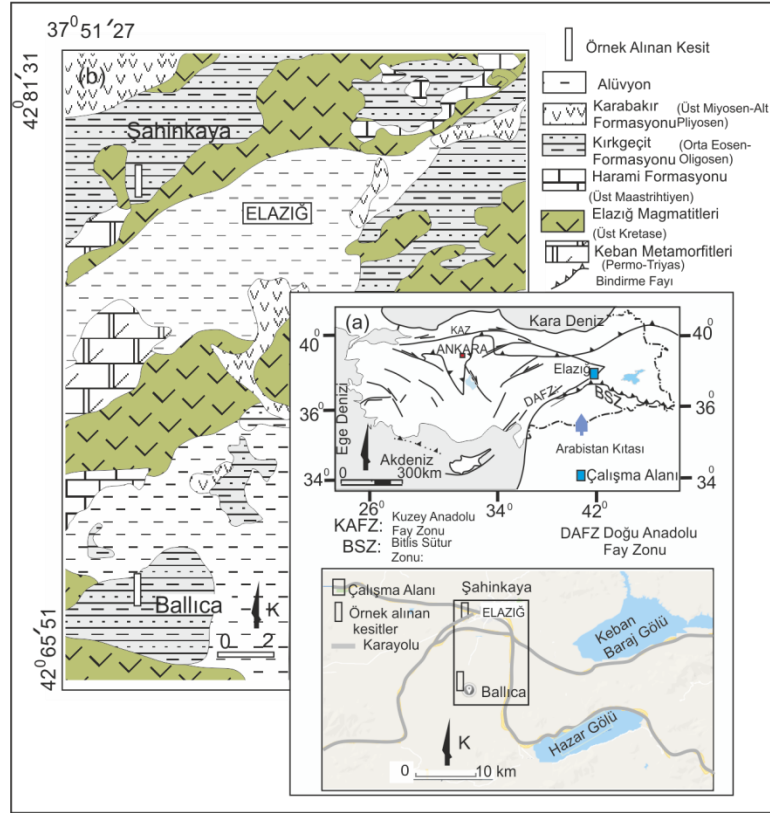
Türkiye'nin önemli tektonik yapılarından Güneydoğu Anadolu Bindirme Kuşağı ve Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin bölgenin yakınında bulunmasından dolayı inceleme alanı ve civarında genel jeolojik çalışmalar yapılmıştır. Doğu Anadolu Bölgesi'nde (Malatya, Elazığ ve Van dolaylarında) geniş alanlara yayılmış olan Kırkgeçit Formasyonu'nun jeolojisi ve Kırkgeçit denizel havzasının oluşumuyla ilgili detaylı çalışmalar Avcı (1983), Özkul ve Üşenmez (1986) tarafından yapılmıştır. Kırkgeçit Formasyonu'nun oluşum ortamı

İnceöz (1996) tarafından çalışılmıştır, araştırmacı Kırkgeçit Formasyonu'nun yay gerisi bir denizel bir havzada depolanmış sedimanlar olduğunu, ve havzanın kuzeyinden ortama kırıntı girişinin olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte daha önce bu sedimanların jeokimyası ortaya konulmamıştır. Bu çalışmada Elazığ güneyinde Balıca Köyü civarında (Şekil 1a) Kırkgeçit Formasyonu'ndan alınan örneklerin major, iz ve nadir toprak elementlerinden yararlanarak genel jeolojik çalışmalara göre bu birimin beslendiği ileri sürülen kuzeydeki Elazığ Magmatitleri'ne jeokimyasal olarak benzerliği karşılaştırılmış, ayrıca bu denizel sedimanların alterasyon derecesi ve sedimanları besleyen kaynak kayacın tektonik oluşum ortamı ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. Jeoloji

Elazığ İli'nin yaklaşık 12 km güneyinde Balıca köyü civarında yer alan Kırkgeçit Formasyonu'na ait sedimanları inceleme konusunu oluşturmaktadır. Yaşlıdan gence doğru çalışma alanındaki birimler Keban Metamorfikleri (Permo-Triyas), Elazığ Magmatitleri (Üst Kretase), Harami Formasyonu (Üst Maastrichtiyen), Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Üst Oligosen) ile Karabakır Formasyonu (Üst Miyosen-Alt Pliyosen) ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır (Şekil 1b).

Keban Metamorfikleri Özgül (1976) tarafından adlandırılmış olup, bu birim Elazığ civarında



Şekil 1.a. İnceleme alanının yer bulduru haritası, b. İnceleme alanının jeolojik haritası (Baykendi 1998'den sadeleştirilmiştir).

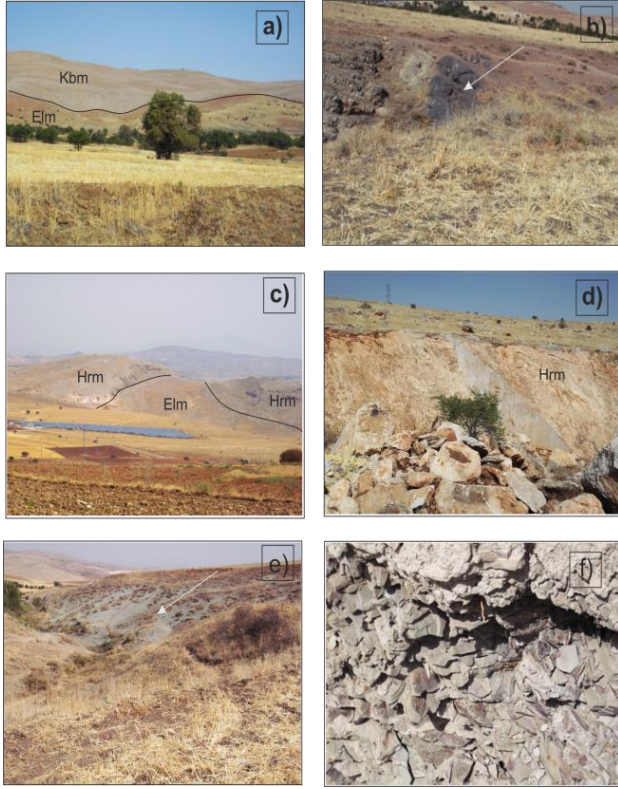
rekristalize kireçtaşı-kalkışit, mermer ve metakonglomera düzeyleri içeren kalkfillitlerden oluşmaktadır. Çalışma alanında mermer ve rekristalize kireçtaşlarından oluşan birim Balıca'nın yaklaşık 8 km kuzeyinde yüzelemektedir (Şekil 1b, 2a). Özgül (1976), birimin Erken Permiyen'den Geç Triyas'a kadar sakin ve sığ denizel bir ortamda şelf tipi kırıntılı ve karbonat depolanmalarının olduğu bir platformda çökeldiğini belirtmiştir.

Elazığ Magmatitleri Perinçek (1979), Yazgan (1984), Akgül (1993) tarafından Yüksekova Karmaşığı Yazgan (1984) tarafından Baskil Magmatitleri, Turan vd. (1995) Elazığ Magmatitleri adı altında incelemişlerdir. Bu çalışmada bu magmatitler için Elazığ Magmatitleri ismi kullanılmıştır. Bingöl (1986) birimin genel olarak gabro, diyorit, monzonit, tonalit ve granodiyorit gibi derinlik kayaçları; bazalt, andezit, dasit ve genellikle andezitik piroklastitler ve tüm bunları kesen granitik kayaçlar ve volkano-sedimanlardan oluştuğunu

belirtmiştir. İnceleme alanında Keban Metamorfite ile magmatitler Balıca'nın kuzeyinde tektonik dokanak oluşturmaktadır (Şekil 1b, 2a).

İnceleme alanı ve çevresinde Balıca ve çevresinde bazaltik lavlar (Şekil 2b), andezitler ağırlıktadır. Magmatitlerin oluşum ortamı için Bingöl (1986), bölgede kuzeye dalımlı bir yitim zonu üzerinde gelişen bir ada yayı ürünü olarak meydana geldiğini belirtmiştir. Turan vd. (1995) ada yayı toleyitleri, ada yayı kalkalkali serisi ile birlikte çarpışma granitoidlerinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Perinçek (1979) birime ait volkano-sedimanlar içerisindeki kırmızı renkli mikritik Kampaniyen-Maestrihtiyen yaşlı fosiller bulmuş, Yazgan (1984), K/Ar radyometrik yaş tayinine dayanarak birime Koniasiyen-Santoniyen-Kampaniyen yaşını vermiştir.

Harami Formasyonu Balıca civarında resifal kireçtaşı istifleri ile temsil olunmaktadır Balıca'nın yakın



Şekil 2a. Elazığ Magmatitleri ve Keban Metamorfitleleri arasındaki tektonik dokanak, b-c. Elazığ Magmatitleri'ne ait bazaltik lavlardan görünüm, d-e. Elazığ Magmatitleri üzerinde uyumsuz olarak yer alan Harami Formasyonu, f-g. Kırkgeçit karbonatlı boz renkli çamurtaşları çamurtaşları, h. Karabakır Formasyonu'na ait bazaltlardan görünüm.

kuzeybatısında Elazığ Magmatitleri üzerinde uyumsuz olarak yer almaktadır (Şekil 1c). Birim inceleme alanında kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır (Şekil 2d). Aksoy vd. (1999) birimin oluşum ortamı için, ada yayı volkanizmasının etkin olmadığı bir dönemde Maastrichtiyen'de, Elazığ Magmatitleri'nin üzerine çökeldiğini belirtmektedir.

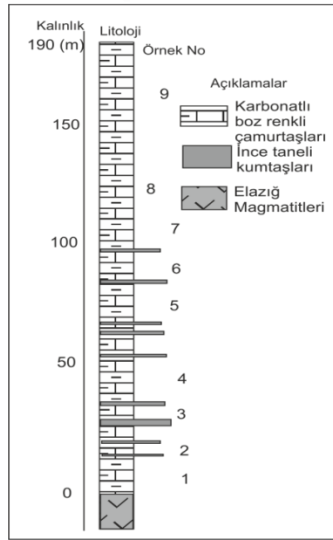
Kırkgeçit Formasyonu inceleme alanında Keban Metamorfitleleri, Elazığ Magmatitleri ve Harami Formasyonu'nu uyumsuz olarak örter (Şekil 1b). Balıca yöresinde geniş yüzeylemeler sunan Kırkgeçit Formasyonu genellikle çok ince taneli kumtaşı ara seviyeleri içeren karbonatlı boz renkli çamurtaşları ile temsil edilmektedir (2e-f). Kırkgeçit Havzası'nın kuzeyinde Elazığ Magmatitleri ve bu magmatitlerden

malzeme almış, bu birimin çakıllarını içeren taban konglomeraları ve kumtaşları ve daha kalın tabakalı seviyelerde rekritalize kireçtaşlarından oluşan Harami Formasyonu ve rekristalize kireçtaşları mermerlerden oluşan Keban Metamorfitleleri bulunmakta olup, bunlar havzayı besleyen kayaç birimleridir. Kırkgeçit Formasyonu'nun oluşum ortamı ile ilgili görüşler farklıdır. Özkul (1988) Kırkgeçit Formasyonu'nun oluşumu için derin deniz self kompleksi üzerinde gelişmiş yay gerisi bir havza olduğunu belirtmiştir. İnceöz (1996) Kırkgeçit Formasyonu'nun yay gerisi, bir havzada depolandığını, şiddetli tektonizmaya bağlı olarak çok hızlı gelişen sübsidans nedeniyle, yörede kısa sürede derin deniz koşullarının oluştuğunu ve ortama kırıntı girişinin kuzeyden olduğunu belirtmektedir. Kırkgeçit Havzası'nın kuzeyinde Elazığ Magmatitleri Özkul (1988), Elazığ batısında Kırkgeçit Formasyonu'nda yaptığı sedimentolojik çalışmada, kırıntılı malzeme taşıyan eski akıntıların havzaya kuzeyden ve farklı noktalardan girip, daha sonra havza içerisinde güneye, güneybatıya ve batıya yöneliklerini belirtmektedir. Araştırmacı havzanın batıya doğru genişlediğini, Kırkgeçit Formasyonu'nun Orta Eosen-Oligosen'deki bir yay gerisi havzada çökeldiğini belirtmiştir. Özkul (1988), Elazığ batısında Kırkgeçit Formasyonu üzerinde yaptığı çalışmada, birime Orta Eosen-Üst Oligosen yaşını vermiştir.

İnceleme alanında Karabakır Formasyonu Elazığ'ın yaklaşık 2 km güneyinde bazaltik kayaçlardan ve gölsel çökellerden oluşmaktadır. Şaroğlu ve Yılmaz (1984), Doğu ve Güneydoğu Anadolu'daki Neojen-Kuvaterner yaşlı volkanizmayı, Orta Miyosen'den beri süregelen sıkışma rejimi ve buna bağlı olarak kalınlaşan kıta kabuğunun kısmi ergimesiyle oluşup, açılma çatlakları boyunca yüzeye çıkması ile ilişkilendirmişlerdir. Yapılan çalışmaları sonucunda Karabakır Formasyonu'nun kireçtaşı üyesinin gölsel ortamda çökeldiği, bazalt üyesinin ise tamamen kıta içi volkanizma ürünleri olduğu belirlenmiştir. Türkmen ve Aksoy (1988) Karabakır Formasyonu'nun yaşı için, Üst Miyosen-Pliyosen yaşını önermiştir.

3. Materyal ve Metod

Balıca Köyü'nün yaklaşık 1 km doğusundan Balıca kesitinde beyaz-boz renkli karbonatlı ince taneli sedimanlardan sistematik olarak örnekler alınmıştır (Şekil 3). 9 adet örneğe ait major, iz element içerikleri ICP-AES ile, nadir toprak elementleri (NTE)'ler ICP-MS ile ACME Analitik Laboratuvarında (Kanada) yapılmıştır. Ana, iz ve nadir toprak elementler 1150 °C'de platin-altın krozeve 1/5 oranında numune ve lityumtetraborat (Li₂B₄O₇) katılmasıyla elde edilmiş cam pelletlerde ICP-AES ve ICP-MS tekniği ile ölçülmüştür.



Şekil 3. Balıca kesitinden alınan örnekler

Bu çalışmadaki örnekler ile daha önce Elazığ merkezde Şahinkaya civarında Kırkgeçit Formasyonu'ndan alınan 10 adet örneğe ait verilerin ortalaması (Akkoca 2018) karşılaştırılmıştır. Ayrıca Kırkgeçit Formasyonu'na malzeme veren

magmatitler olan Elazığ Magmatitleri ile karşılaştırmak için Dönmez (2006) verileri ortalaması kullanılmıştır.

4. Bulgular

4.1. Major ve iz element jeokimyası

Balıca Kesiti örneklerine ait verilerin ortalaması, major, iz element konsantrasyonları, aritmetik ortalama (\bar{x}), standart sapma değerleri (St.Sp.). Tablo 1'de verilmiştir. Bununla birlikte üst kıtasal kabuğu karakterize eden felsik bileşimli Arkean sonrası Avustralya Şeylleri (PAAS) verilmiştir. Tablo1-2'den ve Şekil 4a'da görüldüğü gibi Elazığ il merkezinin yakın kuzeybatısında Kırkgeçit Formasyonu'na ait Şahinkaya kesiti örnekleri ile bu çalışmadaki Balıca kesiti örneklerinin belirgin oranda benzer olması, bu formasyonun bileşiminin Elazığ civarında benzerlik sunduğunu göstermektedir. CaO oranının PAAS bileşimi ve magmatitlere göre daha yüksek olması Kırkgeçit denizel sedimanların karbonatlı çamurtaşları olması bu elementin kalsit gibi karbonat minerallerinden kaynaklanmaktadır. Kırkgeçit denizel havzasına karbonatlı rekristalize kireçtaşları içeren Keban Metamorfileri ve Harami Formasyonu malzeme vermiştir. Element birlikteliklerinin ortaya çıkarılabilmesi için korelasyon analizleri yaygın olarak kullanılırlar (Caritat ve Mann, 2019). Şekil 4b'de Al ile major elementlere ait korelasyon katsayılarını göstermekte olup Ca elementi haricinde Si, Fe, Na, Ti, K ve P elementlerinin pozitif korelasyon göstermesi de karbonat minerallerinden çok bu elementlerin silikat ve fillosilikatlarına bağlı olduğunu göstermektedir. PAAS'a göre CaO dışında örneklerin major oksit içeriklerinin düşük olması örneklerin

Çizelge 1. Ballica örnekleri major ve iz elementler. Şahinkaya örnekleri ortalaması (Akkoca 2018), Elazığ Magmatitleri ortalaması (Dönmez 2006), Arkeen sonrası Avusturalya şeylleri ortalaması (PAAS, Taylor ve McLennan 1985)'den verilmiştir.

	BA2	BA3	BA4	BA5	BA6	BA7	BA8	BA9	BA10	ort	St .Sapma	Şhkaya	ELMAG	PAAS
SiO ₂	22,97	39,14	36,03	39,94	40,68	29,96	37,67	26,21	45,85	35,38	7,46	37,29	55,9	62,4
Al ₂ O ₃	5,07	10,6	9,25	10,95	11,24	7,84	9,57	6,49	12,34	9,26	2,38	9,85	14,86	18,78
Fe ₂ O ₃	3,04	6,72	6,02	7,09	7,51	4,97	6,33	4,09	7	5,86	1,52	5,39	7,43	7,18
MgO	2,87	6,76	6,04	6,86	7,1	5,25	6,23	4,09	3,98	5,46	1,5	3,75	4,51	2,19
CaO	33,4	14,59	18,4	13,73	12,41	24,24	16,55	29,02	12,65	19,44	7,67	19,87	5,92	1,29
Na ₂ O	0,33	0,27	0,19	0,18	0,15	0,05	0,11	0,13	2,12	0,39	0,65	1,22	4,26	1,19
K ₂ O	0,75	2,05	1,7	2,16	2,17	1,18	1,61	1,14	1,12	1,54	0,52	1,11	1,04	3,68
TiO ₂	0,31	0,59	0,51	0,61	0,6	0,43	0,53	0,35	0,75	0,52	0,14	0,55	0,85	0,99
P ₂ O ₅	0,07	0,1	0,11	0,11	0,13	0,09	0,1	0,07	0,08	0,1	0,02	0,08	0,11	0,16
MnO	0,05	0,07	0,09	0,07	0,08	0,08	0,1	0,08	0,11	0,08	0,02	0,08	0,14	0,11
Cr ₂ O ₃	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,01
LOI	30,9	18,9	21,4	18,1	17,7	25,7	20,9	28,1	13,8	21,7	5,18	20,59	4,88	-
Toplam	99,86	99,87	99,87	99,88	99,88	99,84	99,78	99,79	99,83	99,8	0,04	99,86	99,97	-
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	16,3	17,9	18,1	17,9	18,7	18,2	18	18,5	16,4	17,8	17	17,8	17,48	18,97
CIA	72	77	78	78	79	74	71	70	70	75	3,6	64	-	-
CIW	81	91	93	94	95	97	96	93	62	89	11	83	-	-
CIA/CIW	1,13	1,19	1,19	1,2	1,19	1,15	1,17	1,17	0,88	1,14	0,09	0,77	-	-
Ba	527	159	129	150	137	114	337	186	111	205,6	138,8	122	103,32	650
Ni	112	298	282	307	369	200	339	189	49	238,3	107,9	101	88,36	55
Sc	9	18	16	19	20	15	16	11	20	16	3,9	15	28	16
Co	11,7	24,9	26,3	21,1	33,6	15,4	34,4	21,1	16,6	22,8	7,8	17	23,2	23
Cs	1,8	5,3	3,9	5,5	5,3	3,2	4,4	3,3	0,7	3,7	1,7	2	0,2	15
Ga	4,1	10,5	8,6	10,6	11,5	7,9	10,8	6,5	11,6	9,1	2,6	9	14,6	15
Hf	1,3	2,1	1,8	2,1	2,2	1,5	1,9	1,3	2,1	1,8	0,4	2	2,4	5
Nb	4,2	8	6,9	8,1	8,1	4,9	7,4	5,3	2,3	6,1	2,1	4	1,6	1,9
Rb	25,1	68,7	54,9	71,9	72	41	56,4	40,2	25,3	50,6	18,6	32	28,8	160
Sr	734,1	356,4	380,3	267,2	222,9	711,9	375,4	732,1	158,9	437,7	228,2	370	193,2	200
Th	2,3	5,1	4,2	5,1	4,9	3,3	4,4	3,2	1,9	3,8	1,2	2	1,7	14,6
U	1,2	1,5	1,1	1,3	1,3	1,4	1,1	1,1	0,8	1,2	0,2	1	0,3	3,1
V	65	135	111	129	147	98	130	94	196	122,8	37,3	118	229	150
Zr	56,3	84,8	68,4	80,6	81,2	60,7	68,3	48,5	69,1	68,7	12,2	65	76,8	210
Y	9,5	13,5	12,6	14,3	14,4	11,5	13,4	10,6	21,5	13,5	3,4	14	28,8	27
Mo	0,2	0,2	0,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	1	0,86	---
Cu	16	37,5	36	40,2	44,3	31,3	38,9	25,7	36,7	34,07	8,6	30	36,78	50
Pb	4,6	8,2	6,3	6,9	8,7	3,3	7,5	6,6	9,5	6,84	1,96	8	0,8	20
Zn	26	68	61	67	72	51	63	54	69	59	14,2	56	58	85
Ni	117,9	305,1	285,5	317,8	378,3	204,1	336,7	181,3	38,3	240,56	112,45	101	88,36	55
Cr	224,4	299,2	285,6	299,2	319,6	204	292,4	190,4	102	246,31	71,46	240,04	115,6	68
TiO ₂ /Zr	55,06	69,57	74,56	75,68	73,89	70,84	77,59	72,16	108,53	76,64	13,91	84,61	88,54	47,14

karbonatlı olması ve karbonatın seyreltme etkisinden kaynaklanmaktadır. Herron (1988) diyagramında Log (SiO₂/Al₂O₃)' e karşı log (Fe₂O₃/K₂O) oranına göre örnekler Fe' ce zengin şeyl alanına düşmektedir (Şekil 4c).

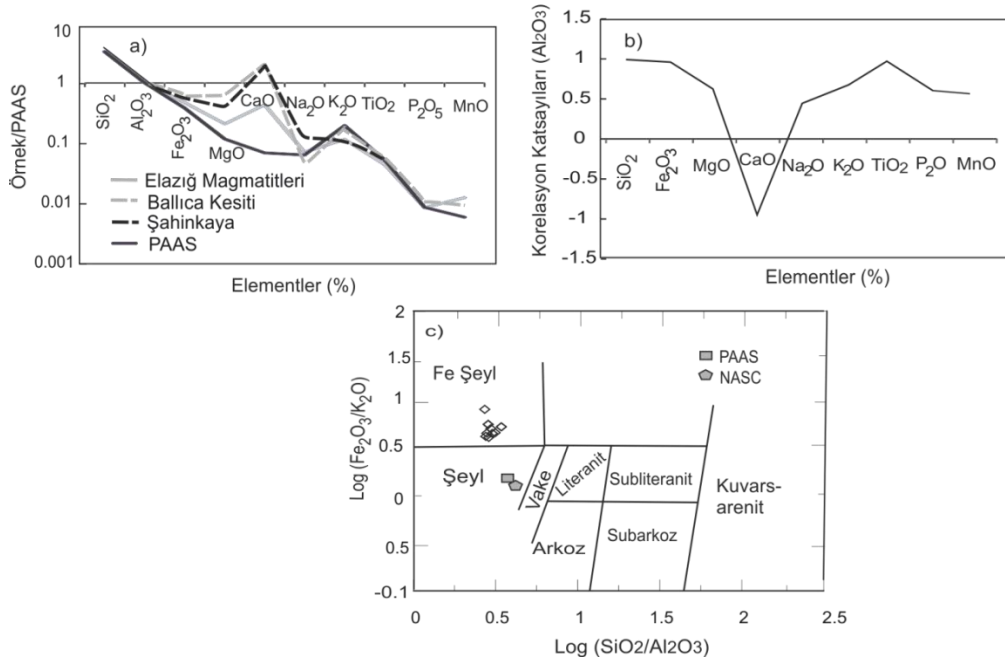
4.2. Nadir toprak element jeokimyası

Her üç gruba ait nadir toprak elementleri (NTE) Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda ortalamalardan görüldüğü gibi Ballica ve Şahinkaya örnekleri benzer NTE bileşimine sahiptir. Toplam NTE CaO ve Sr dışındaki major ve iz elementlerle pozitif korelasyon göstermektedir (Şekil 5a-b). CaO ve Sr elementi karbonat minerallerine bağlı olup (Dix 2006), diğer major oksit ve iz elementlerin NTE 'ler ile pozitif korelasyonu bu elementlerin ve fillosilikatlara bağlı olduğunu yansıtır. Fillosilikatların NTE'leri içerdiği Coppin vd. (2002), tarafından belirtilmiştir.

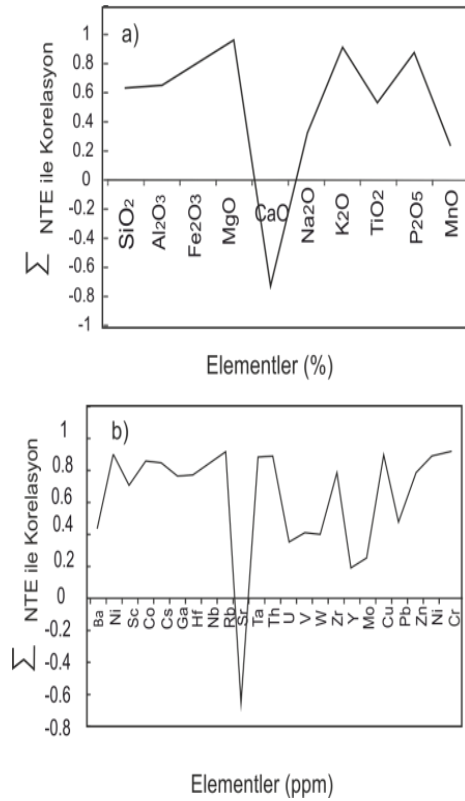
5. Tartışma

5.1. Kaynak kayaç alterasyon derecesi

Sedimanter kayaçların ayrışma dereceleri tanımlamak için en yaygın olarak kullanılan CIA indeksi (Kimyasal Alterasyon İndeksi) $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$ formülü ile hesaplanmıştır. CaO* silikat minerallerindeki CaO' u ifade eder (Nesbit ve Young 1982). Örnekler karbonatlı olup, CO₂ değerleri ölçülmediği durumda CaO* olarak CaO x 10 / 3 kullanılır (Maynard 1982, Fedo vd. 1995). Ancak bu değer Na₂O'dan yüksek ise Na₂O değerleri CaO* olarak kabul edilir (Mourabet vd. 2018). Bu hesaplamada CaO x 10 / 3 ile elde edilen değerler Na₂O'dan yüksek olduğu için CaO* olarak Na₂O değerleri kullanılmıştır. CIA değerleri magmatik



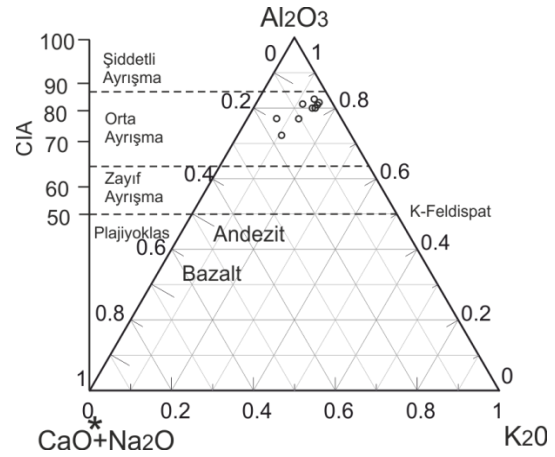
Şekil 4. a. Örneklerde major oksitlerin PAAS'a normalize diyagramları. Şahinkaya örnekleri ortalaması (Akkoca 2018), Elazığ Magmatitleri ortalaması (Dönmez 2006), Arkeen sonrası Avusturalya şeylleri ortalaması (PAAS, Taylor ve McLennan, 1985). b. Al₂O₃ elementlerinin major oksitlerle korelasyon katsayılarını gösteren grafik, c. Log (SiO₂ / Al₂O₃)' e karşı log (Fe₂O₃ / K₂O) Herron diyagramında örneklerin dağılımı. NASC: Kuzey Amerika şeyl kompozisyonu (Gromet vd. 1984).



Şekil 5. Toplam nadir toprak elementleri (NTE) ile a. Major oksitler b. İz elementler arasındaki korelasyon katsayılarını gösteren grafik, arasındaki korelasyon katsayılarını gösteren grafik.

kayaç ve feldispatlarda 50, şeyllerde 70-75 olup bu değer 80 ve 100 arasında olması kaynak alanın yüksek derecede alterasyona maruz kaldığını gösterir (Fedo vd. 1995). Balıca kesiti örneklerinde CIA indeksi ortalama CIA değerleri 75 'dir (Tablo 1). Nesbit ve Young (1982) Al₂O₃ - CaO* + Na₂O - CaO* + K₂O üçgen diyagramında da örnekler orta derecede altere olduğu görülmektedir (Şekil 6).

Karbonat içeren örneklerde bir diğer alterasyon indeksi olan CIW değerleri Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO* + Na₂O) x 100 ile hesaplanır (Harnois 1988).



Şekil 6. Nesbit and Young (1982) Al₂O₃- CaO*+ Na₂O - K₂O üçgen diyagramında örneklerin dağılımı

Hesaplanan bu değerlerin ortalaması 89.69 olup CIW/CIA değerlerinden yararlanılarak denizel havzaya malzemenin kaynak kayaca olan mesafesi hakkında fikir elde edilir, bu değer düşük kaynağın yakınlığını ve taşınmanın mesafesinin az olduğunu gösterir (Gao ve Wedepohl 1995). Bu değer düşük kaynağın yakınlığını ve taşınmanın mesafesinin az olduğunu gösterir (Gao ve Wedepohl 1995, Eker 2012). İnceleme alanı için hesaplanan ortalama CIW/CIA değerleri 1.14 olup bu değer düşük değerler sunması denizel havzaya malzemenin yakın çevre kayalardan geldiğini göstermektedir.

ICV sedimanların olgunlaşmış (mature) ya da olgunlaşmamış (immature) olup olmadığını belirten bir diğer indekstir (Fe₂O₃ + K₂O + Na₂O + CaO* + MgO + TiO₂) / Al₂O₃ formülü ile hesaplanır. Örneklerin karbontalı olması dolayısıyla bu hesaplamada da CaO* olarak NaO alınmıştır (Mourabet vd. 2018). ICV<1 ise yüksek derece alterasyondan kaynaklanan olgunlaşmış sedimanları gösterirken, ICV>1 ise düşük derece alterasyondan kaynaklanan olgunlaşmamış sedimanları yansıtır (Cox ve Cullers 1995).

Çizelge 2. Balıca örnekleri nadir toprak elementleri Şahinkaya örnekleri ortalaması (Akkoca 2018), Elazığ Magmatitleri ortalaması (Dönmez 2006), Arkeen sonrası Avusturalya şelleri ortalaması (PAAS, Taylor ve McLennan 1985)'den alınmıştır.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Eu/Eu*
BA2	10.1	17.7	2.07	8.6	1.56	0.48	1.76	0.26	1.59	0.92
BA3	15	27.2	3.07	12.7	2.56	0.7	2.59	0.4	2.39	0.87
BA4	14	25.9	2.99	11.4	2.43	0.59	2.35	0.36	2.34	0.85
BA5	16.2	29	3.38	12.7	2.68	0.7	2.72	0.42	2.49	0.87
BA6	16.7	30	3.38	12.9	2.71	0.69	2.78	0.43	2.39	0.88
BA7	10.9	18.3	2.34	9.4	2	0.56	2.06	0.32	1.99	0.88
BA8	15.7	25.9	3.07	12.3	2.69	0.68	2.54	0.4	2.51	0.84
BA9	12.1	17.9	2.28	8.9	1.76	0.47	1.78	0.3	1.85	0.87
BA10	6.8	13.9	1.92	8.5	2.35	0.85	3	0.57	3.86	0.98
ort	13.06	22.87	2.72	10.82	2.3	0.64	2.4	0.38	2.38	0.88
St. sapma	3.32	5.9	0.57	1.93	0.43	0.12	0.44	0.09	0.64	0.04
Şahinkaya	9.1	16.8	2.2	8.8	2	0.6	2.4	0.4	2.4	0.93
ELMAG	10.5	23.3	3.32	15.2	3.9	1.22	5.07	0.9	5.06	0.82
PAAS	38	80	8.83	33.9	5.6	1.1	4.66	0.77	4.68	0.64

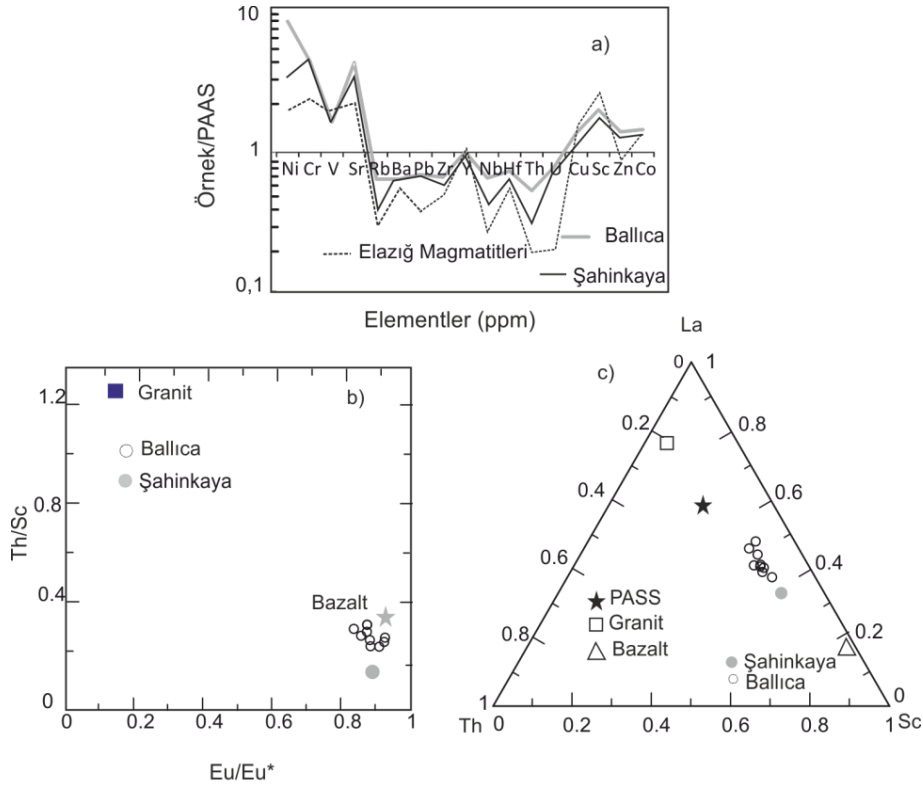
Olgunlaşmamış sedimanlar tektonik olarak aktif ortamlardaki havzalarda oluşan sedimanlara işaret

eder. ICV değeri Balıca kesitinde 1.23-1.61 arasında olup bu değerlerin >1 olması Balıca örneklerin olgunlaşmamış sedimanları temsil ettiğini göstermiştir (Tablo 1). Gerçekten Özkul (1988) Kırkgeçit Formasyonu üzerinde yaptıkları çalışmalarda, formasyonun yaklaşan bir levha sınırında yay gerisi, havzada şiddetli tektonizmaya bağlı olarak çok hızlı gelişen sübsidans havzası olarak geliştiğini belirtmişlerdir.

5.2. Kaynak kayaç bileşimi

Sedimanter kayaçların jeokimyası, bu sedimanların türediği kaynak kayaçların jeokimyasını yansıtması bakımından önemli ipuçları sağlar (Taylor ve McLennan 1985). Bazı major elementler sedimanların kaynak alanının ortaya konulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rosser ve Korsch 1986, Armstrong

Altrin vd. 2004, 2012). Kayaçların ayrışması, taşınması, çökmesi ve diyajenezi boyunca Al_2O_3/TiO_2 oranları fazla değişikliğe uğramamaktadır. SiO_2 içeriğinin artması bu oranın da artmasına neden olmaktadır. Magmatik kayaçlarda Ti, piroksen, hornblend, klorit, biyotit, ilmenit gibi mafik minerallere bağlı iken, Al feldispatlara ve killere bağlıdır ve Al_2O_3 / TiO_2 oranlarını mafik kayaçlar için 3-11, ortaç bileşimli kayaçlar için 11-21 ve felsik kayaçlar için 21-70 aralığındadır (Hayashi vd. 1997). Balıca kesiti örneklerinde ortalama Al_2O_3 / TiO_2 oranı ortalama 17.8 olup (Tablo 1), buna göre örnekler ortaç bileşime uymaktadır. Ural vd. (2015) inceleme alanı ve civarında Kırkgeçit Formasyonu'na malzeme veren Elazığ Magmatitleri'nde bazaltların bulunduğu, bununla birlikte ortaç bileşimli andezit bileşimli kayaçlarının ağırlıklı olduğunu belirtmiştir. Th, Zr, Ba, Rb, Hf, Nb, Pb, U elementleri felsik kayaçlarda daha yüksek miktarda bulunurlar (Mishra ve Sen 2012). PAAS bileşimine normalize diyagramda element miktarları Balıca kesiti ve Şahinkaya kesitinde Elazığ



Şekil 7. Ballica örnekleri a. iz elementlerinin PAAS'a normalize diyagramı, b. Eu/Eu^* - Th/Sc diyagramı (Cullers ve Podkovyrov 2002), c. La-Th-Sc üçgen diyagramı (Cullers 1994).

Magmatitleri'ne benzerlik sunmakta olup (Şekil 7a) bu elementler Ballica kesiti örneklerinde felsik bileşimli PAAS'a göre daha düşüktür. Sc, V, Co, Cr, Ni elementleri ise mafik kayaçlarda daha çok zenginleşir (Taylor ve McLennan 1985). Şekil 7 a'da görüldüğü gibi bu elementler PAAS'a göre daha yüksektir, bu da örneklerin kıtasal karakterli PAAS'a göre daha az felsik karakterli olduğunu, yani nötr bazik bileşimli olduğunu göstermektedir.

Sedimanların kaynak kaya bileşiminin tespitinde TiO_2/Zr oranı kullanılmakta olup, mafik kayaçlarda >200 , ortaç kayaçlar için 195-55 arasında, felsik kayaçlarda <55 'dir (Hayashi vd. 1997). Bu oran Ballica kesiti örneklerinde ortalama 75.50 olup örnekler ortaç karakterli kayaçlara uymaktadır.

Sedimanter kayaçların köken belirlemede diğer önemli elementler Eu, La, Sc, Th ve Co'dır

(Winchester ve Floyd 1989). Ballica kesiti örneklerindeki Eu/Eu^* - Th/Sc oranına göre Kırkgeçit sedimanlarını besleyen kaynak kayaçların bileşimi bazik kaynak kayaç bileşimine uyuyor iken; La-Th-Sc üçgen diyagramında örneklerin PAAS ve granitten farklı ve andezit ve bazalt aralığında olduğu görülmüştür (Şekil 7b-c). Ballica Kesiti örneklerinin La/Sc, Th/Sc, Co/Th oranları granit, andezit ve ofiyolitlerle karşılaştırılmıştır. Buna göre her iki kesitte örnekler andezit alanına düşmektedir (Tablo 2).

Mafik kayaçlar düşük HNTE/ANTE oranı ve anomali göstermeyen Eu değerine sahip olup, felsik kayaçlar, genellikle yüksek HNTE/ANTE oranı ve negatif Eu anomalisi gösterirler. (Cullers ve Graf 1983). İncelenen örneklerde Eu/Eu^* oranları Ballica kesitinde 0.88 olması önemli bir Eu anomalisinin olmadığını göstermektedir (Tablo 2).

Çizelge 3. Balıca örnekleri element oranları. Şahinkaya bölgesinde örneklerin ortalaması (Akkoca 2018), Elazığ Magmatitleri ortalaması (Dönmez 2006), Arkeen sonrası Avusturalya şelleri ortalaması (PAAS, Taylor ve McLennan 1985)'den verilmiştir. a. Condie (1993), b.Spadea vd. (1980), c.Cullers (1994), d.Taylor and McLennan (1985)'den alınmıştır.

	La/Sc	Sc/Th	Co/Th
Andezit ^a	0.9	4.65	4.65
Granit ^a	8	0.28	0.17
Ofiyolit ^b	0.25	56	70
Bazik kaynak ^c	0.4-1.1	20-25	7.1-8.3
Felsik kaynak ^d	2.5-16	0.05-1.2	0.22-1.5
Balıca	1.12	4.57	6.11
Şahinkaya	0.75	7.07	7.55

Şekil 8' de de kondrit normalize diyagramda felsik bileşimli PAAS bileşimine göre HNTE/ANTE oranının düşük olduğu ve önemli Eu anomalisinin olmadığı görülmesi, inceleme alanındaki örneklerin felsikten çok ortaç-bazik ağırlıklı kaynak kayaca sahip olduğunu göstermiştir.

5.3. Tektonik Ortam

La/Sc, Ti/Zr oranlarına göre çizilen diyagram (Bhatia ve Crook, 1986) inceleme alanındaki örneklerin okyanus adayı ortamında depolanmış kayalardan türediğini göstermektedir (Şekil 9a). Aynı şekilde Bhatia ve Crook (1986) Th-Sc-Zr/10 üçgen diyagramında ise örnekler okyanus ada yayı alanına düşmektedir (Şekil 9b). Gerçekten inceleme konusu sedimanların temel kayacı ve birime malzeme veren magmatitleri temsil eden Elazığ Magmatitleri'nin

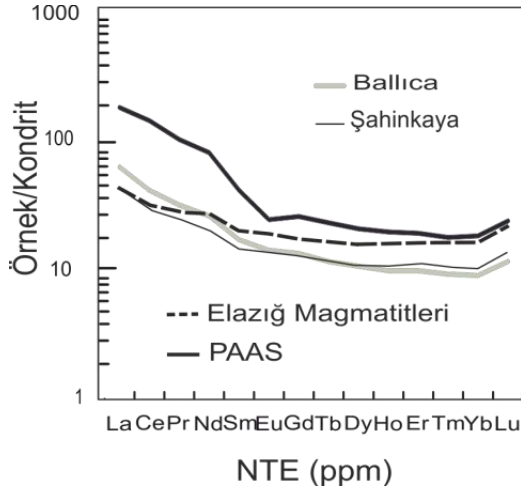
okyanus adayı ortamında olduğu Hempton ve Savcı (1982) tarafından belirtilmiştir. Benzer şekilde güncel çalışmalardan Dönmez (2006), Tanyıldızı (2014), Ural vd. (2015) Elazığ Magmatitleri'nin Neotetis'in güney kolunun dalma-batma ile ilişkili Geç Kretase'de oluşan ada yayı ortamında oluştuğunu ileri sürmüştür. İnceleme alanından alınan Kırkgeçit sedimanlarının da bileşim olarak okyanusal yay özelliği göstermesi, okyanusal adayı ortamında oluşmuş olan Elazığ Magmatitleri'nin Kırkgeçit sedimanlarının bileşiminde etkili olduğu ve Kırkgeçit Havzasına malzeme verdiğini göstermektedir.

6. Sonuçlar

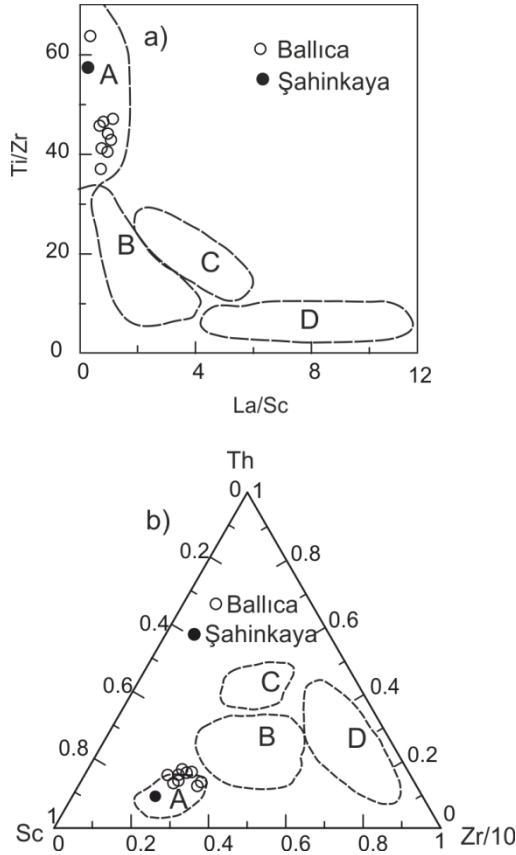
Bu çalışmada Balıca (Elazığ güneyi) civarındaki Orta Eosen - Üst Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu'na ait karbonatlı ince taneli sedimanlardan alınan örneklerin jeokimyası ortaya çıkarılmıştır. İnceleme alanındaki birimler yaşlıdan gence doğru; Keban Metamorfite (Permo- Triyas), Elazığ Magmatitleri (Üst Kretase), Harami Formasyonu (Üst Maastrichtiyen), Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Üst Oligosen) ile Karabakır Formasyonu (Üst Miyosen- Alt Pliyosen) ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır.

Sedimanların yüksek miktarda Ca içermesi kuzeyde beslenme alanında Keban Metamorfite ve Harami Formasyonu'na ait rekristalize kireçtaşlarından kaynaklanmaktadır.

Örneklerin CIA değerlerine göre orta dereceli alterasyona uğramış olan kaynak kayalardan türeyen Kırkgeçit sedimanlarının CIW/CIA oranı ortalamalarının da düşük olması sedimanların tektonik olarak aktif bir denizel havzada çöktüğünü göstermekte olup, bu daha önceki çalışmalarla uyum içerisindedir.



Şekil 8. Balıca örnekleri NTE 'lerin Kondrite normalize diyagramı. Şahinkaya örnekleri ortalaması (Akkoca 2018), Elazığ magmatitleri ortalaması (Dönmez,2006), Arkeen sonrası Avusturalya şelleri ortalaması (PAAS, Taylor ve McLennan, 1985) verilmiştir.



Şekil 9. Balıca örneklerinin Bhatia ve Crook (1986) a. La/Sc-Ti/Zr diyagramında, b.Th-Sc-Zr/10 üçgen

diyagramında dağılımı. A = Okyanus adayı, B = kıtasal adayı, C = aktif kıtasal kenar, D= pasif kıtasal kenar.

ICV değerleri de bu hızlı sedimantasyondan dolayı sedimanların olgunlaşmamış olduğunu göstermiştir. Log (SiO₂/Al₂O₃)' e karşı log (Fe₂O₃/K₂O) oranına göre örnekler Fe' ce zengin şeyl alanına düşmektedir. Al₂O₃/TiO₂ ve TiO₂/Zr oranlarına göre Balıca örnekleri ortaç bileşime uymaktadır. Eu/Eu*, Th/Sc, Th/Co, La/Sc oranlarının kullanıldığı diyagramlarda örnekler nötr, bazik bileşimlidir. La-Th-Sc üçgen diyagramında örnekler andezit ve bazalt aralığındadır. PAAS bileşimine göre örneklerin düşük HNTE/ANTE oranına sahip olması ve yüksek Eu/Eu* oranları da sedimanların ortaç-bazik mafik bileşime sahip olduğunu, dolayısıyla bu bileşimdeki kayaçlardan beslendiğini gösterir. La/Sc, Ti/Zr, La/Sc, Sc/Zr diyagramında örnekler okyanusal ada yayı özelliğini göstermiştir.

Kırkgeçit sedimanlarının beslendiği kaynak alan içerisinde Keban Metamorfileri ve Harami Formasyonu'na ait karbonatlı kayaçlar bu sedimanların karbonatca zengin olmasına neden olmuştur. Elazığ Magmatitleri ise Kırkgeçit Formasyonu'nu besleyen kuzeydeki magmatik birim olup, Kırkgeçit Formasyonu'nun jeokimyasal bileşim olarak bu magmatitleri yansıttığı bu çalışmada görülmüştür.

7. Katkı Belirtme

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiş olan (FÜBAP) MF. 18.03 nolu projeden üretilmiştir. Makalenin incelenmesi sırasında yapmış oldukları katkılarından dolayı hakemlere teşekkürü boç bilizir.

Kaynaklar

- Akgül, B., 1993. Piran (Elazığ) köyü çevresindeki mağmatik kayaçların petrografik ve petrolojik özellikleri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 128.
- Akkoca, Bal, D., 2018. First data on the geochemistry of the Kırkgeçit marine clayey sediments at the northern vicinity of Elazığ, (Eastern Turkey). CILICIA International Symposium on Engineering and Technology (CISSET), Mersin, Türkiye, 168-175.
- Aksoy, E., Türkmen, İ., Turan M., ve Meriç, E., 1999. Harami Formasyonu'nun (Üst Kampaniyen-Maastrichtiyen) stratigrafik konumu ve çökeltme ortamı ile ilgili yeni bulgular, Elazığ Güneyi, *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, **11 (1)**, 1-15.
- Alizai, A., Hillier, S., Clift, P.D., Giosan, L., Hurst, A. and VanLaningram, S., 2012. Macklin, M. Clay mineral variations in Holocene terrestrial sediments from the Indus Basin. *Quaternary Research*, **77**, 368–381,
- Armstrong – Altrin, J.S., Lee, Y.I., Verma, S.P. and Ramasamy, S., 2004. Geochemistry of sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, **74**, 285–297.
- Armstrong – Altrin, J.S., Lee, Y.I. and Kasper-Zubillaga, J.J. ve Carranza-Edwards, A., 2012. Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: implication for provenance. *Chemie der Erde-Geochemistry* **72 (4)**, 345-362.
- Armstrong – Altrin, J.S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Rosalez-Hoz, L., Rosalez-Hoz, L., Lee, Y.I., Balaram, V., Cruz – Martínez ve A. and Avila - Ramírez, G., 2013. Geochemistry of the Jurassic and upper Cretaceous shales from the Molango Region, Hidalgo, Eastern Mexico: implications of source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Comptes Rendus Geoscience*, **345**, 185–202.
- Armstrong - Altrin, J.S., 2015. Evaluation of two multidimensional discrimination diagrams from beach and deep-sea sediments from the Gulf of Mexico and their application to Precambrian clastic sedimentary rocks. *International Geology Review*, **57**, 1446-1461.
- Avşar, N. 1983. Elazığ yakın kuzeybatısında stratigrafik ve mikropaleontolojik araştırmalar. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 84.
- Bennert, T., Hanson, D. and Maher, A. 2005. Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise. *Journal of Testing and Evaluation*, **33(2)**, 94-100.
- Baykendi, O., 1998. Tadım, Dedeyolu, Badempınarı (Elazığ) köyleri ve çevresinin jeolojisi ve magmatik kayaçların petrografik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 70.
- Bhatia, M.R. and Crook, K., 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **92**, 181-193.
- Bingöl, A.F., 1986. Petrographic and petrological characteristics of intrusive rocks of Guleman ophiolite (Eastern Taurus-Turkey). *Geosound*, **13 (4)**, 41-57.
- Caritat, P. de, Mann, A. 2019. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. **19 (1)**, 58–73.
- Condie, K.C., Marais, D.J.D. and Abbott, D., 2001. Precambrian superplumes and supercontinents: a record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates. *Precambrian Research*, **106**, 239-260.
- Coppin, F., Berger, G., Bauer, A., Castet, S. and Loubet, M., 2002. Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chemical Geology*, **182**, 57-68.
- Cox, R., Lowe, D.R. and Cullers, R., 1995. A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sediment cover. *Journal of Sedimentary Research*, **1**, 1-12.
- Cullers, R.L. and Graf, J., 1983. Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: intermediate and silicic rocks, ore petrogenesis. Editors: Henderson P. Rare-Earth Geochemistry, Amsterdam, the Netherlands, Elsevier, 275-312.
- Cullers, R.L., 1994. The controls on major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 4955-4972.

- Cullers, R.L. and Podkovyrov, V.N., 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling. *Precambrian Research*, **104**, 77-93.
- Dix, G., 2006. Origin of anhedral Sr-rich calcite in deep-water mixed sediment, north-east Australia. *Sedimentology*, **42** (5), 711-724.
- Dönmez, C., 2006. Soğanlı-Uyandık (Elazığ) arasında yüzeyleyen Elazığ Magmatileri'nin Jeolojisi, petrografisi ve jeokimyası. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 75.
- Eker, S. Ç. 2012. Petrography and geochemistry of Eocene sandstones from eastern Pontides (NE Turkey): Implications for source area weathering, provenance and tectonic setting. *Geochemistry International*, **50** (8), 683-701.
- Fedo, C.M., Eriksson, K. and Krogstad, E.J., 1996. Geochemistry of shale from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone belt, Zimbabwe: implications for provenance and source area weathering". *Geochimica Cosmochimica Acta*, **60**, 1751-1763,
- Gao, S. and Wedepohl, K.H., 1995. The negative Eu anomaly in Archean sedimentary rock: implications for decomposition, age and importance of their granitic sources. *Earth and Planetary Science Letters*, **133**, 81-94.
- Garzanti, E., Al-Juboury, A.I., Zoleikhaei, Y., Vermeesch, P., Jotheri, J., Akkoca, Bal, D., Obaid, AK., Allen, M.B., Andó, S., Limonta, M., Padoan, M., Resentini, A., Rittner, M. and Vezzoli, G., 2016. The Euphrates-Tigris-Karun River system: Provenance, recycling and dispersal of quartz-poor foreland-basin sediments in arid climate". *Earth Science Reviews* **162**, 107-128,
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A. and Korotev, R.I., 1984. The North American Shale Composite: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 2469-2482.
- Harnois, L., 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, **55**, 319-322,
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D. and Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochim Cosmochim Acta* **61**, 4115-4137. ,
- Hempton, M.R. and Savcı, G., 1982. Petrological and structural features of the Elazığ volcanic complex". *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni* **25**, **143-151**.
- Herron, M.M. , 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data". *Journal of Sedimentary Research*, **58**, 820-825.
- İnceöz, M., 1996. Elazığ yakın kuzeyinde Harami Formasyonunun (Üst Maastrichtiyen) stratigrafisi ve çökelme ortamları". *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, **8(1)**, 130-136.
- Maynard, J.B., 1992. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols". *The Journal of Geology*, **100**, 279-289.
- Mishra, M. and Sen, S., 2012. Provenance, tectonic setting and source-area weathering of Mesoproterozoic Kaimur Group, Vindhyan Supergroup, Central India. *Geologica Acta*, **10**, 283-293.
- Mourabet, M.E., Barakat, A., Zaghloul, M.N. and Baghdadi, M.E., 2018. Geochemistry of the Miocene Zoumi flysch thrust-top basin (External Rif, Morocco): a new constrains on source area weathering, recycling processes, and paleoclimate conditions. *Arabian Journal of Geosciences* **11(126)**, 2-18.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717,
- Özgül, N., 1976. Toroslar'ın bazı temel jeolojik özellikleri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni* , **19**, 65-78.
- Özkul, M. ve Üşenmez, Ş., 1986. Elazığ kuzeydoğusunda derin deniz konglomeralarının sedimentolojik incelenmesi. G.Ü. *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **1, 2**, 53-57.
- Özkul , M., 1988. Elazığ batısında Kırkgeçit Formasyonu üzerinde sedimentolojik incelemeler. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 186.
- Roser, B.P and Korsch, R.J., 1986. Determination of tectonic setting of sandstone - mudstone suites using SiO₂ content and I₂O / Na₂O ratio. *The Journal of Geology* **94**, 5, 635-650.
- Şaroğlu, F.ve Yılmaz, Y., 1984. Doğu Anadolu'nun Neotektoniği ve İlgili Mağmatizması. T.J.K. Ketin Sempozyumu, Ankara, 149-162.

- Tao, H., Wang, Q., Yang, X. and Jiang, L., 2013. Provenance and tectonic setting of Late Carboniferous clastic rocks in West Junggar, Xinjiang, China: A case from the Hala-alat Mountains. *Journal of Asian Earth Sciences*, **64**, 210-222.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. 1st ed. Oxford, UK: Blackwell.
- Turan M, Aksoy E ve Bingöl AF., 1995. Doğu Toroslar'ın jeodinamik evriminin Elazığ civarındaki özellikleri. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **7(2)**, 177-199.
- Türkmen, İ ve Aksoy, E., 1998. Arapgir (Malatya), Çemiflgezek (Tunceli), Elazığ dolaylarındaki Neojen birimlerinin stratigrafik-sedmantolojik incelenmesi ve bölgesel korelasyonu. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, **10(1)**, 15-33.
- Ural, M., Arslan, M., Göncüoğlu, M.C., Tekin, U.K. and Kürüm, S. 2015. Late cretaceous arc and back-arc formation within the southern Neotethys: whole-rock, trace element and Sr-nd-Pb isotopic data from basaltic rocks of the Yüksekova Complex (Malatya- Elazığ, SE Turey). *Ofioliti*, **4**, 57-72.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, **20(4)**, 325-343.
- Yazgan, E. 1984. Geodynamic evolution of the E. Taurus region. Editors: O Tekeli and MC Göncüoğlu, Proceedings of the Geology of the Taurus Belt. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 199-208.

İki Boyutlu Çatlak Poblemlerinde J İntegralin Sayısal Çözümü**Mete Onur KAMAN¹, Ahmet Murat AŞAN^{2*}**¹ Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ.Sorumlu yazar e-posta*: ahmetmuratasan@hotmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9174-7585
mkaman@firat.edu.tr ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0178-6079

Geliş Tarihi: 03.12.2019

Kabul Tarihi: 27.08.2020

Öz**Anahtar kelimeler** J -integral; ANSYS; Sonlu elemanlar metodu; Kırılma tokluğu; Çatlak

Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçalara ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Kırılma tokluğu ise, çatlaklı bir malzemenin kırılmaya karşı direncini gösteren malzemelerin mekanik özelliklerinden biridir ve J -integral yöntemi, kırılma tokluğunun geometriden bağımsız ölçümünü veren bir yöntemdir. Bu çalışmada, izotropik özelliklere sahip kenar çatlaklı numune, farklı takviye açlarına sahip 45° merkez çatlaklı ortotropik özellikte dikdörtgen numune ve merkezinde farklı açılarda çatlaklar ihtiva eden izotropik özelliklere sahip kare numune için, J -integral'i değerleri ANSYS APDL kullanılarak tespit edilmiştir. ANSYS kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, simgesel bir matematik yazılımı kullanılarak, analitik olarak ta elde edilerek, sayısal ve analitik sonuçlar mukayese edilmiştir. Sonuçta; J -integralin çatlak ucuna olan uzaklığına göre değişimi incelenmiş olup, sayısal ve analitik sonuçlar arasındaki hata payının % 0.0462 ile % 2.8149 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Numerical Solution of J Integral in Two Dimensional Crack Problems**Abstract****Keywords** J -integral; ANSYS; Finite element method; Fracture toughness; Crack

Fracture is defined as breaking of materials under stress and breaking them into more than one part. On the other hand, fracture toughness is one of the mechanical properties of materials showing the resistance of a material that has a crack and the J -integral method is a method that gives the geometry independent measurement of fracture toughness. In this study, the J -integral values were determined for a specimen which is a crack in its edge and having isotropic properties, a rectangular specimen which is orthotropic properties in addition to different reinforcement angles and having a 45° crack in its center and a square specimen which is the different cracks in its center and having isotropic properties using ANSYS APDL. Numerical results obtained using ANSYS were also obtained analytically by using a symbolic mathematics software and numerical and analytical results were compared. As a result; The variation of the J -integral with respect to the distance to the crack tip was investigated and it was found that the error margin between numerical and analytical results varied between 0.0462 % and 2.8149 %.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Kırılma, insanların oluşturmuş olduğu yapılar varlığını devam ettirdiği süre boyunca toplumun karşılaşacağı bir problemdir. Tasarımı yapılan karmaşık yapılar ve elde edilen ileri teknoloji bu problemlerin önceki yüzyıllardan daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu duruma örnek olarak, uzay teknolojisinin gelişmesi ile birlikte hava yolu kazalarının meydana gelmeye başlaması,

verilebilir. Meydana gelen bu tür problemlerin engellenebilmesine kırılma mekaniği alanında sağlanan ilerlemeler yardımcı olmuştur. Malzemelerde hasarların meydana gelmesinin aşamaları ve malzemelerin hasarlardan korunabilmesi için yapılan işlemler zaman içerisinde artış göstermiştir. Hasarların felaketle sonuçlanması neticesinde, ekonomide büyük zararlar meydana gelmektedir. Hasarın en aza indirilmesi, kırılma mekaniğinde sağlanan gelişmeler sayesinde mümkün olur. Çünkü; Kırılma mekaniğinin inceleme

alanı çoğunlukla kırılmadan dolayı oluşan hasarlardır. Kırılma ile ilgili olarak yapılan ilk çalışma, Griffith tarafından cam malzemelerdeki gevrek çatlakların ilerlemesinin incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith, yapı üzerinde var olan bir çatlağın, sistemin sahip olduğu toplam enerjisindeki azalma neticesinde ilerlemeye başlayacağını formülasyonunu elde etmiştir (Griffith 1921). Griffith, öngördüğü basit enerji dengesinde, gerilmenin etkisi altında bulunan bir sistemde, çatlağın ilerlemesi ile birlikte elastik şekil değiştirme enerjisinde bir azalmanın ortaya çıktığını belirtmiştir (Griffith 1921). Bu enerjinin de, çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerji olduğunu tespit etmiştir. Griffith' in sunmuş olduğu enerji dengesi çalışmasının ardından Irwin, enerji dengesinin, plastik deformasyon esnasında yapılmış olan iş ve yüzey enerjisi ile depo edilen şekil değiştirme (genleme) enerjisi arasında olması gerektiğini irdelemiş ve sünek malzemeler üzerinde yeni çatlak yüzeylerinin meydana gelmesi için gerekli olan enerjinin, plastik deformasyon esnasında yapılmış olan iş yanında genellikle önemsiz derecede küçük olduğunu savunmuştur (Irwin 1960). Irwin, bu çalışması sonucunda, birim kalınlık başına, meydana gelen, çatlak uzunluğundaki birim artış için depo edilen toplam enerjiyi tanımlayan aynı zamanda çatlak itici gücü veya enerji yayılım hızı olan G , olarak isimlendirdiği bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K ' nin ve G ' nin eşdeğer olması, Lineer Elastik Kırılma Mekaniği' nin (LEKM) ilerlemesine temel sağlamıştır. Çünkü, tüm malzemeler için, bir çatlak ucunun etrafında ve yakınında oluşan gerilme dağılımının durumu her zaman aynı olur. Dolayısıyla, standart numuneler için kritik gerilme şiddet faktörü K_C ' nin tespit edilmesinin, belirli şartlarda ve gerçek yapılarda, deneylerin yapılması sonucunda, hangi hataların oluşmasına izin verilebileceği belirlenebilir (Özdemir 2006). İzotropik malzemelere göre hasar davranışı çok daha karmaşık olan kompozit malzemelerin kırılma davranışını incelemek, bu tür malzemelerin günümüzdeki hızlı kullanım artışı nedeniyle büyük önem kazanır. Balaban ve Tee (2019), vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilen, PVC (Poli Vinil Clorür) köpük çekirdekli cam elyaf takviyeli

yüzeyle sahip sandviç kompozit kirişin şekil değiştirme enerjisi salınım hızı açısından kırılma tokluğunu, deneysel olarak, üç nokta eğme testi (3 ENF) kullanarak tespit etmişlerdir. Sayısal olarak ise, J -integrali yöntemini ve sanal çatlak kapanma tekniği (VCCT)'ni bir sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS'de kullanarak hesaplamışlardır. Ayrıca, sandviç kompozit kirişlerin; çekirdek kalınlığının ve çekirdek yoğunluğunun, kompozit malzeme numunelerinin uzunluğunun, numunelerin yükleme yönlerinin değişiminin sandviç kompozit kirişlerin şekil değiştirme enerjisi salınım hızı (SERR) üzerindeki etkilerini gözlemlemek için, Mod-II yükleme koşulları altında parametrik bir çalışma yapmışlardır. Maksimum SERR değerinde meydana gelen değişimleri, sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sonuçları ve deneysel yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçları grafikler kullanarak karşılaştırmışlardır. Gu vd. (2011), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, V şeklinde kenar çentiğe sahip Al7075-T6 malzemesinin bir ve dört tabakalı kompozit malzeme yamalarıyla onarılmasını araştırmışlardır. Kontür integral yöntemini kullanarak, uygulanan yapıştırıcı kalınlığının, yama malzemesi kalınlığının ve kompozit yamanın tabaka diziliminin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, yamanın performansı üzerinde, yapıştırıcı kalınlığının ve kayma dayanımının önemli olduğunu tespit etmişlerdir. Vavrik ve Jandejsek (2014), alüminyum alaşımlı malzemedan imal edilmiş V şeklinde kenar çentiğe sahip sünek ince duvarın kırılma tokluğunu, ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak sayısal olarak hesaplamışlardır. Sayısal çalışma ile bağlantılı olarak çeşitli deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aleksic vd.(2018) , yüksek sıcaklıklarda çalışmaya dayanıklı krom ve molibden alaşımlı düşük karbonlu mikroalyaj bir çelik olan 14MoV6-3 için kritik J – integral değerini, deneysel ve sayısal olarak hesaplamışlar ve elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Wen ve Aliabadi (1995), kontür integrali yöntemini sınır eleman yöntemi ile birlikte kullanarak, farklı şekillerde çatlağa sahip levhaların gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır. Lei vd.(2019), klasik çatlak örneklerine ait gerilme şiddet faktörlerini tespit etmek amacı ile, J –integrali yöntemi'ni, M –integrali yöntemi'ni ve

yeni geliştirilmiş bir yöntem olan, genelleştirilmiş sonlu farklar yöntemi (GFDM)'ni kullanmışlardır. Analitik değerlerle ve kullandıkları farklı yöntemler ile elde ettikleri sonuçları kendi aralarında karşılaştırmışlardır.

Bu araştırmalar ışığında, mevcut literatürden farklı olarak, gerilme şiddet faktörleri belirlenmiş durumda olan fakat kırılma tokluğunun geometriden bağımsız ölçümünü veren J –integral değerleri tespit edilmemiş durumdaki, kenar çatlaklı numune, merkez çatlaklı kare numune ve merkez çatlaklı dikdörtgen numune için, ANSYS APDL kodları kullanılarak J –integral değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, ortotropik özellik gösteren merkez çatlaklı dikdörtgen numune için, ANSYS içerisinde üç farklı koordinat eksenini (fiber açısı, çatlak açısı ve bu iki açı arasındaki fark) tanımlamak yerine, indirgeme matrisleri kullanılarak malzemelerin mekanik özellikleri doğrudan elde edilmiş ve kullanılmıştır. ANSYS kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, simgesel bir matematik yazılımı kullanılarak, analitik olarak ta elde edilerek, sayısal ve analitik sonuçlar mukayese edilmiştir.

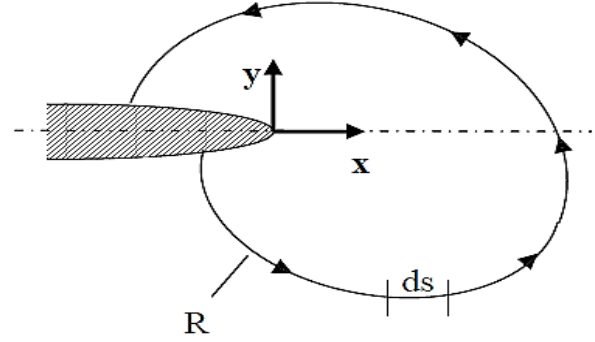
2. J – Integral Metodu

Lineer olmayan elastik malzemelerin kırılma tokluğunu tespit etmek amacı ile geliştirilmiş olan bu yöntem, çatlak ilerlemesi ile bağlantılı olarak potansiyel enerjide meydana gelen değişimin tespit edildiği, enerjinin korunumu prensibine dayanmaktadır. J –integrali, fiziksel olarak ise, yük uygulanmış bir yapıdaki a çatlak uzunluğunun, Δa kadar artış gösterip $a + \Delta a$ olduğunda meydana gelen, potansiyel enerji farkı olarak tanımlanabilir. Aynı zamanda J –integral, lineer olmayan malzemelerde oluşan şekil değişimlerini ve çatlak ucu gerilmelerini de tanımlar. Enerjinin doğrusal integrali, elastik- plastik bir malzeme davranışı için, Şekil 1'deki gibi, çatlakın çevresinde keyfi olarak seçilen yoldan bağımsız olarak;

$$J = \int_R \left[w dy - T_i \left(\frac{du_i}{dx} \right) ds \right] \quad (1)$$

formülasyonu ile tanımlanabilir. Denklem 1'de, $i = x, y$ olmak üzere; R çatlak ucunu çevreleyen

herhangi bir eğriyi, w şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu, T_i eğriye dik yönde uygulanan gerilme vektörünü, u_i yer değiştirme vektörünü, ds eğri boyunca oluşan birim uzunluk artışını belirtir (Liu et al. 2000).



Şekil 1. Çatlak ucunu çevreleyen kapalı eğri (Özdemir 2006).

Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu w , σ (gerilme)– ϵ (genleme) eğrisinin altında kalan alan için;

$$w = \left(\int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \right) \quad (2)$$

ile gösterilir.

3. Ortotropik Malzemeler için Kırılma Mekanikliği

Sürekli fiber takviyeli düzlem kompozitler, ortotropik malzeme davranışı gösterir. Fiber takviye açısının değişimi ile bu özelliği monoklinik malzemeye döner. Gerilme-genleme bağıntıları arasındaki ilişki birleştirilerek iki boyutlu bir problem bu tür malzemeler için;

$$\begin{aligned} S_{22} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^4} - 2S_{26} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^3 \partial x_2} + (2S_{12} + S_{66}) \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^3 \partial x_2} - \\ 2S_{16} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_2^3 \partial x_1} + S_{44} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_2^4} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

denklemleri ile tanımlanabilir (Rice 1968). Burada ϕ , sanal gerilme fonsiyonudur.

Denklem 3'deki, S_{ij} katsayıları, kompliyans matrisi elemanlarıdır. Ortotropik malzemeler için; $S_{16} = S_{26} = S_{63} = 0$ olur (Gibson 2012). $n = 1, 2, 3, 4$ olmak üzere D_n ;

$$D_n = \frac{\partial}{\partial x_2} - \mu_s \frac{\partial}{\partial x_1} \quad (4)$$

olarak yazılabilir. Denklem 4, $D_1 D_2 D_3 D_4(\phi) = 0$ haline gelir.

$$[S_{22} - 2\mu S_{26} + (2S_{12} + S_{66})\mu^2 - 2S_{16}\mu^3 + S_{11}\mu^4] = 0 \quad (5)$$

μ_n , Denklem 5'teki karakteristik denklemin çözümünden elde edilen dört adet kökü temsil eder. Bu kökler;

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \alpha_1 + i\beta_1 \\ \mu_2 &= \alpha_2 + i\beta_2 \\ \mu_3 &= \bar{\mu}_1 \\ \mu_4 &= \bar{\mu}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

ile ifade edilir. Burada, α_j ve β_j ($j = 1, 2$) gerçek köklerdir. i ise; $i = \sqrt{-1}$ 'dir. Denklem 6, kompleks eşlenik kökleri temsil eder. Bu yüzden anizotropik durum için gerilmeler ve yer değiştirmeler, z_j kompleks koordinatları ve kompleks eşlenik kökleri cinsinden;

$$z_j = x_1 + \mu_j x_2 \quad (7)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 1'in sayısal integrasyonu ile elde edilen, çatlak içeren homojen anizotropik levhalar için J - integrali denklemleri J_1 ;

$$J_1 = \alpha'_{11} K_I^2 + \alpha'_{12} K_I K_{II} + \alpha'_{22} K_{II}^2 \quad (8)$$

olur (Lekhnitskii 1963). Denklem 8'de;

$$\begin{aligned} \alpha'_{11} &= -\frac{S'_{22}}{2} \text{Im} \left(\frac{s_1 + s_2}{s_1 s_2} \right) \\ \alpha'_{22} &= \frac{S'_{11}}{2} \text{Im}(s_1 + s_2) \\ \alpha'_{12} &= -\frac{S'_{22}}{2} \text{Im} \left(\frac{1}{s_1 s_2} \right) \frac{S'_{11}}{2} \text{Im}(s_1 s_2) \end{aligned} \quad (9)$$

Denklem 9'da s_1 ve s_2 , malzeme özellik parametreleri olup, Denklem 5'deki kökler ile ilişkilidir ve

$$s_j = \frac{\mu_j \cos \beta + \sin \beta}{\cos \beta - \mu_j \sin \beta} \quad (10)$$

olarak yazılabilir. Denklem 10'da, β çatlak açıdır ve $j = 1, 2$ 'dir. S'_{ij} , S_{ij} kompliyans sabitlerinin, global koordinat sisteminden lokal koordinat sistemine dönüşümünden elde edilen sabitlerdir (Chu *et al.* 1990). Bunlar;

$$\begin{aligned} S'_{11} &= S_{11} \cos^4 \beta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \beta + \\ &S_{22} \sin^4 \beta + (S_{16} \cos^2 \beta + S_{26} \sin^2 \beta) \sin 2\beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S'_{22} &= S_{11} \sin^4 \beta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \\ &S_{22} \cos^4 \beta + (S_{16} \cos^2 \beta + S_{26} \sin^2 \beta) \sin 2\beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S'_{12} &= S_{12} + (S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - \\ &S_{66}) \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \frac{1}{2} (S_{26} - S_{16}) \sin 2\beta \cos 2\beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S'_{66} &= S_{66} + 2(S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^2 2\beta + \\ &2(S_{26} - S_{16}) \sin 2\beta \cos 2\beta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S'_{16} &= [S_{22} \sin^2 \beta - S_{11} \cos^2 \beta + \frac{1}{2} (2S_{12} - \\ &S_{66}) \cos 2\beta] \sin 2\beta + (S_{16} \cos^2 \beta) (\cos^2 \beta - \\ &3 \sin^2 \beta) + (S_{26} \sin^2 \beta) (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S'_{26} &= [S_{22} \cos^2 \beta - S_{11} \sin^2 \beta + \frac{1}{2} (2S_{12} - \\ &S_{66}) \cos 2\beta] \sin 2\beta + (S_{16} \sin^2 \beta) (3 \cos^2 \beta - \\ &\sin^2 \beta) + (S_{26} \cos^2 \beta) (\cos^2 \beta - 3 \sin^2 \beta) \end{aligned}$$

olur. Denklem 11'deki, S_{jk} ($j, k = 1, 2, 6$) elastik kompliyans matris elemanları;

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

$$S_{16} = \frac{\eta_{12,1}}{E_1}$$

$$S_{26} = \frac{\eta_{12,2}}{E_2}$$

ile ifade edilir. Denklem 12'de, $\eta_{jk,1}, \eta_{1,jk}$ sırasıyla birinci ve ikinci tür karşılıklı etki katsayılarını temsil etmektedir. İzotropik malzemeler için; $\alpha'_{11} = \alpha'_{22} = \frac{1}{E}$ ve $\alpha'_{12} = 0$ olur. Bu yüzden izotropik malzemeler için,

$$J_1 = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (13)$$

olur. Burada K_I ve K_{II} sırasıyla Mod-I ve Mod-II için gerilme şiddet faktörlerini, E elastisite modülünü, ν ise Poisson oranını temsil eder. Farklı takviye açıları için mekanik özelliklerin belirlenmesinde;

$$\begin{aligned}\overline{S_{11}} &= S_{11} \cdot m^4 + S_{22} \cdot n^4 + (2 \cdot S_{12} + S_{33}) \cdot n^2 m^2 \\ \overline{S_{12}} &= S_{21} = S_{12} \cdot (n^4 + m^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{33}) \cdot n^2 m^2 \\ \overline{S_{13}} &= S_{31} = (2S_{11} + 2S_{12} - S_{33}) \cdot nm^3 - (2S_{22} + S_{12} - S_{33}) \cdot n^3 m \\ \overline{S_{23}} &= S_{32} = (2S_{11} + 2S_{12} - S_{33}) \cdot n^3 m - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{33}) \cdot nm^3 \\ \overline{S_{22}} &= S_{11} \cdot n^4 + S_{22} \cdot m^4 + (2 \cdot S_{12} + S_{33}) \cdot n^2 m^2 \\ \overline{S_{33}} &= 2 \cdot (2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{33}) \cdot n^2 m^2 + S_{33}(n^4 + m^4)\end{aligned}\quad (14)$$

formülasyonları kullanılır. Denklem 14'te elde edilen dönüştürülmüş kompliyans matrisi katsayıları Denklem 12'de yerine koyulup malzemenin yeni mekanik özellikleri elde edilmiş olur. Burada m ve n ifadeleri; $m = \cos \theta$ ve $n = \sin \theta$ 'dır (Tan *et al.* 1992). θ ise, fiber yönlenme açısını temsil eder.

4. Materyal ve Yöntem

Bu başlık altında, izotropik özelliklere sahip kenar çatlaklı numune (Levha-I, Şekil 2), farklı takviye açılarına sahip 45° merkez çatlaklı ortotropik özellikte dikdörtgen numune (Levha-II, Şekil 3) ve merkezinde farklı açılarda çatlak ihtiva eden izotropik özelliklere sahip kare numune (Levha-III Şekil 4) için uygulanan analitik ve sayısal çalışmalar açıklanmıştır. Numunelere ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Numune özellikleri.

Çatlak açısı β	Levha/Malzeme	W genişlik (m)	H yükseklik (m)	a Çatlak boyu (m)
0°	I/İzotropik	1	1	0.2
45°	II/Ortotropik	1	1	0.2
0°, 30°, 45°, ϵ	III/İzotropik	1	1	0.2

Analizlerde kullanılan numunelerin mekanik özellikleri, Çizelge 2'de verilmiştir. (-x,-y) global eksen takımı ile çakışmayan (1, 2) lokal eksen

takımına sahip ortotropik malzemelerin global eksen takımına dönüştürülmüş yeni mekanik özelliklerinin elde edilmesinde Bölüm 3'te verilen dönüşüm formülasyonları kullanılmıştır. 1 fiber takviye doğrultusunu, 2 ise fibere dik doğrultuyu temsil eder.

Çizelge 2. Numunelerin mekanik özellikleri.

İzotropik Malzeme				
	E (GPa)		ν	
	200		0.3	
Ortotropik Malzeme				
Fiber yönlenme açısı θ	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)
0°	48.26	17.24	0.290	6.89
45°	18.88	18.88	0.370	11.02
90°	17.24	48.26	0.104	6.89
105°	16.98	37.59	0.160	7.60
120°	16.98	24.85	0.275	9.58
135°	18.88	18.88	0.370	11.02

4.1 Analitik çalışmalar

İzotropik özelliklere sahip kenar çatlaklı numune Levha-I, farklı takviye açılarına sahip 45° merkez çatlaklı ortotropik özellikte dikdörtgen numune Levha-II ve merkezinde farklı açılarda çatlaklar ihtiva eden izotropik özelliklere sahip kare numune Levha-III olarak tanımlanmış olup bu levhalar için J –integral değerleri Denklem 8 kullanılarak analitik olarak tespit edilmiştir. Analitik sonuçların elde edilmesinde kullanılan, gerilme şiddet faktörü değerleri için Wang (2005) referansı kullanılmıştır. Sınır şartlarında $\sigma=1$ Pa'dır.

4.1.1 Levha-I

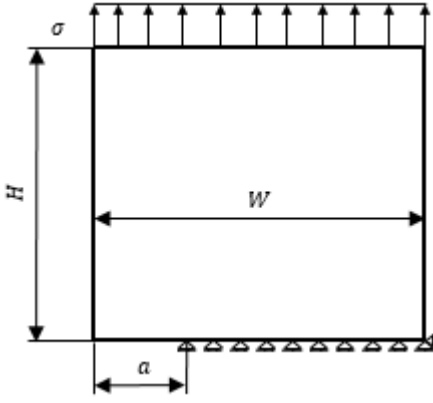
Şekil 2'de izotropik özelliklere sahip kenar çatlaklı numune verilmiştir (Levha-I). σ çekme gerilmesi etkisi altında kenar çatlaklı numune için, Mod-I gerilme şiddet faktörü;

$$K_I = f\left(\frac{a}{W}\right) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (15)$$

formülasyonu kullanılarak hesaplanabilir. Burada $f\left(\frac{a}{W}\right)$ şekil fonksiyonu olup kenar çatlaklı sonlu genişlikteki bir numune için

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.12 - 0.231\left(\frac{a}{W}\right) + 10.55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (16)$$

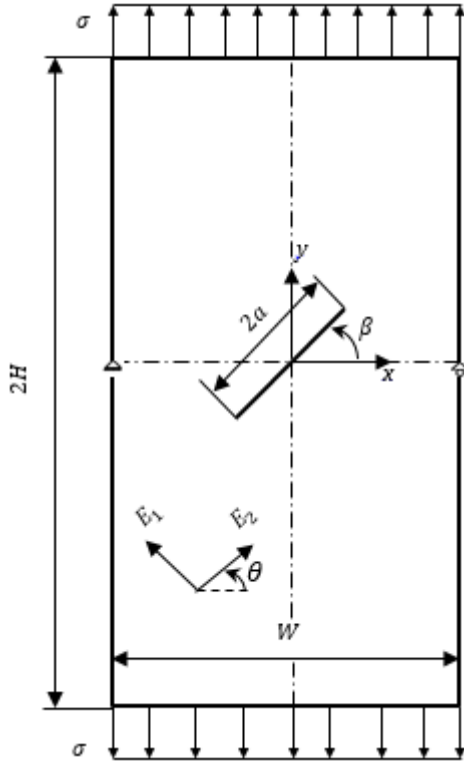
şeklinde verilir.



Şekil 2. Kenar çatlaklı izotropik levha boyutları ve sınır şartları.

4.1.2 Levha-II

Şekil 3'de $\beta = 45^\circ$ merkez çatlaklı ortotropik özellikte dikdörtgen numune verilmiştir (Levha-II).



Şekil 3. Merkezi çatlaklı ortotropik levha boyutları ve sınır şartları.

Şekil 3'deki, merkez çatlaklı dikdörtgen numune için, gerilme şiddet faktörleri;

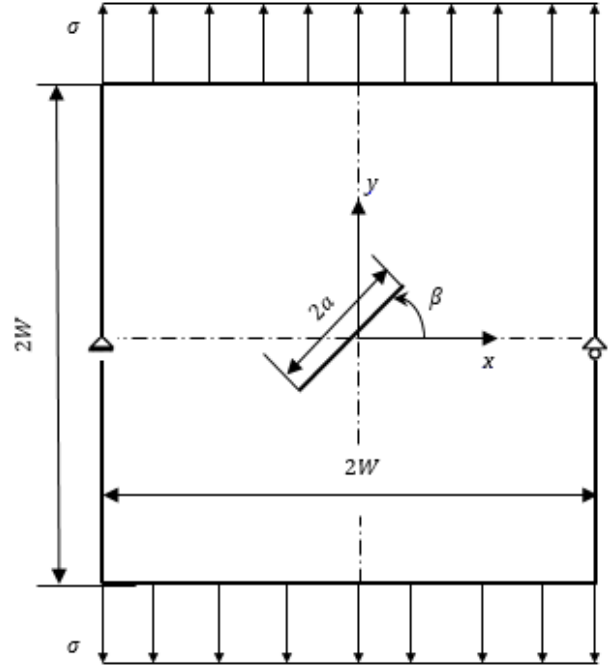
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cos^2(\beta) \quad (17)$$

$$K_{II} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin(\beta) \cos(\beta) \quad (18)$$

formülasyonları kullanılarak hesaplanabilir.

4.1.3 Levha-III

Şekil 4'de merkezinde farklı açılarda çatlaklar ihtiva eden izotropik özelliklere sahip kare numune verilmiştir.



Şekil 4. Merkezi çatlaklı izotropik levha boyutları ve sınır şartları.

Şekil 4'deki merkez çatlaklı kare numune için, gerilme şiddet faktörleri Denklem 17'deki ve Denklem 18'deki formülasyonlar kullanılarak hesaplanabilir.

4.2 Sayısal çalışmalar

Levha-I, Levha-II ve Levha-III için, J –integral değerleri, ANSYS kullanılarak tespit edilmiştir. ANSYS ile J –integrali değerleri belirlenirken, izotropik ve ortotropik malzemeler için kullanılabilen PLANE 183 eleman tipi seçilmiş olup, eleman ayarlarından düzlem şekil değiştirme durumunu temsil eden, seçenek aktif hale getirilmiştir. Tüm modellerde sonlu elemanlara bölme hassasiyeti çatlak ucunda artırılmıştır. Çatlak uçlarında tekil sonlu elemanlar kullanılmıştır.

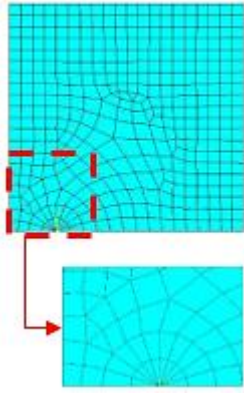
4.2.1 Levha-I

İzotropik özelliklere sahip kenar çatlaklı Levha-I numunesi için, sonlu eleman özellikleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Levha-I için sonlu eleman ağ yapısı özellikleri.

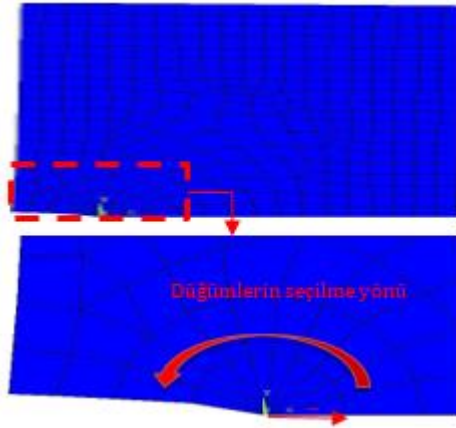
Eleman boyutu (m)	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
0.05	386	1219

Şekil 5'de yarım olarak modellenen kenar çatlaklı numunenin sonlu eleman ağ modeli verilmiştir.



Şekil 5. Levha-I için sonlu eleman modeli.

Şekil 2' de verilen sınır şartları kullanılarak statik analiz yapılır, çözümler yapıldıktan sonra çatlak ucunda yerel koordinat düzlemi oluşturularak, Şekil 6'da, numuneler için verilen deformasyon şekilleri üzerinde saat ibrelerinin hareketinin tersi yönündeki düğüm noktaları çatlak ucundan itibaren r yarıçapı boyunca seçilir. Farklı r yarıçapları için oluşturulan eğri üzerinden integral hesabı tekrarlanır.



Şekil 6. Levha-I için çatlak ucu deformasyon şekli.

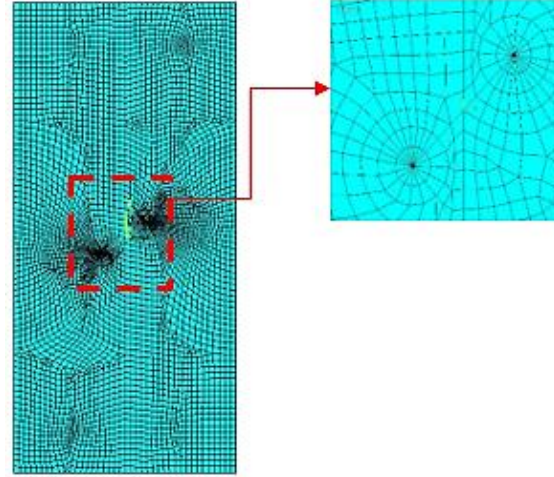
4.2.2 Levha-II

Ortotropik özellikte merkez çatlaklı dikdörtgen numune, Levha-II için, sonlu eleman ağ yapısı ile ilgili özellikler Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Levha-II için sonlu eleman ağ yapısı özellikleri.

Fiber yönelme açısı θ	Eleman boyutu (m)	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
0°	0.05	5844	17416
45°	0.05	3582	10850
90°	0.05	3200	9774
105°	0.05	3200	9774
120°	0.05	3623	10999
135°	0.05	3886	11684

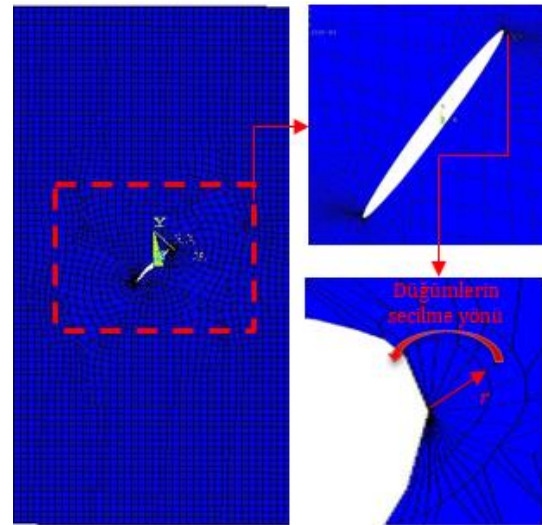
Şekil 7'de, ortotropik özellikte merkez çatlaklı dikdörtgen Levha-II numunesinin sonlu elemanlara ayrılmış hali verilmiştir.



Şekil 7. Levha-II için sonlu eleman modeli.

Levha II için, Şekil 3' de verilen sınır şartları kullanılarak çözümler yapılır, çözümler yapıldıktan sonra çatlak ucunda yerel koordinat düzlemi oluşturularak, numuneler için verilen deformasyon şekilleri üzerinde saat ibrelerinin hareketinin tersi yönündeki düğüm noktaları r yarıçapı boyunca seçilir (Şekil 8).

4.2.3 Levha-III



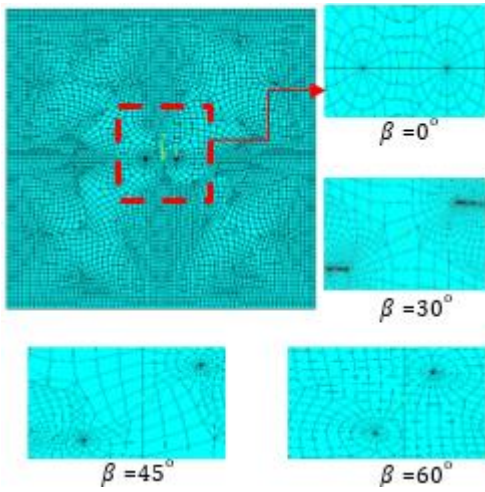
Şekil 8. Levha-II için çatlak ucu deformasyon şekli.

Merkezinde farklı açılarda çatlaklar ihtiva eden izotropik özelliklere sahip kare numune, Levha-III için, sonlu eleman modeli ile ilgili özellikler Çizelge 5'de verilmiştir.

Şekil 9'da ise merkezinde farklı açılarda çatlak bulunduran izotropik özelliklere sahip kare numunenin sonlu eleman modeli verilmiştir.

Çizelge 5. Levha-III için sonlu eleman ağ yapısı özellikleri.

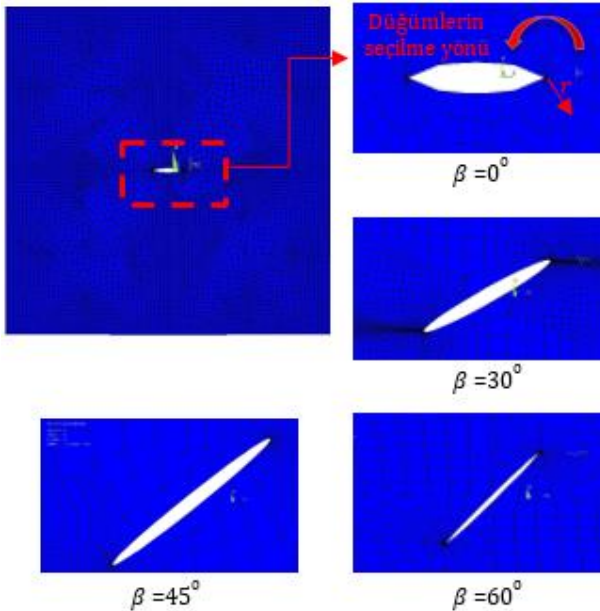
Çatlak açısı β	Eleman boyutu (m)	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
0°	0.05	5591	16917
30°	0.05	13389	23842
45°	0.05	9806	29430
60°	0.05	6992	21058



Şekil 9. Levha-III için sonlu eleman modeli.

J –integral değerlerinin tespit edilebilmesi için ilk adımda; ANSYS programında verilen sınır şartlarına uygun olarak statik analiz gerçekleştirilir. Çözümler yapıldıktan sonra çatlak ucunda yerel koordinat düzlemi oluşturularak, Şekil 6, 8 ve 10’da, numuneler için verilen deformasyon şekilleri üzerinde saat ibrelerinin hareketinin tersi yönündeki düğüm noktaları r yarıçapı boyunca seçilir.

İkinci adımda ise, seçilen düğüm noktaları üzerinden Denklem 1’de verilen formülasyondaki değerler özel olarak yazılan APDL (ANSYS Parametric Design Language) kodlarının ANSYS programında tekrar çalıştırılması sonucu Çizelge halinde elde edilerek integral hesabı yaptırılır. Bu işlem her üç model için de tekrarlanır.

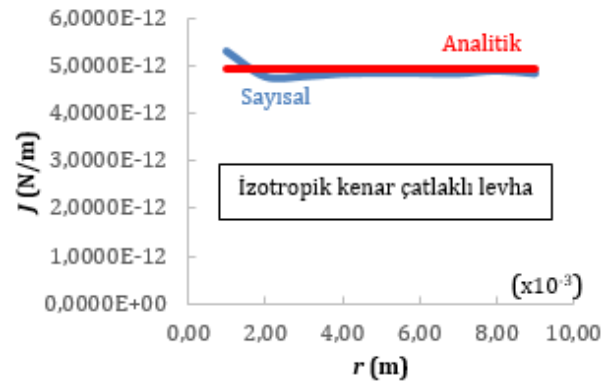


Şekil 10. Levha-III için çatlak ucu deformasyon şekli.

5.Sonuçlar

Şekil 11’ de, kenar çatlaklı numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş J –integralin r ’ye göre

değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 11. Levha-I için $J - r$ sonuçları.

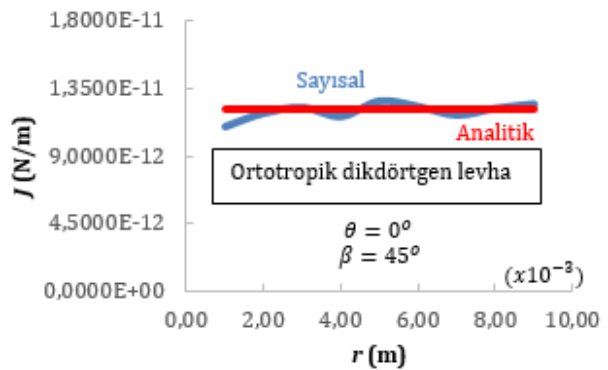
Şekil 11’ deki grafiğe göre, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.090$ m’de % 1.10 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 6’ da, kenar çatlaklı numune için, sayısal ve analitik olarak elde edilen, J – integrali sonuçları arasındaki minimum hatanın tespit edildiği değer verilmiştir.

Çizelge 6: J –integrali sonuçları için minimum hata miktarları.

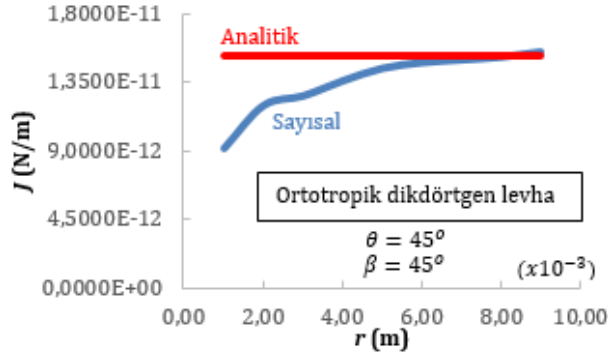
Numune	r (m)	Sayısal (N/m)	Analitik (N/m)	Hata (%)
Levha-I	0.090	4.8890E-12	4.9435E-12	1.10

Şekil 12’ de, $\theta = 0^\circ$ takviye açılı $\beta = 45^\circ$ merkez çatlaklı dikdörtgen numune, Levha-II’ye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J – integralin r ’ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları verilmiştir. Şekil 12’ deki grafiğe göre, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.0006$ m’de % 0.9440 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 12. $\theta = 0^\circ$ için Levha-II $J - r$ sonuçları.

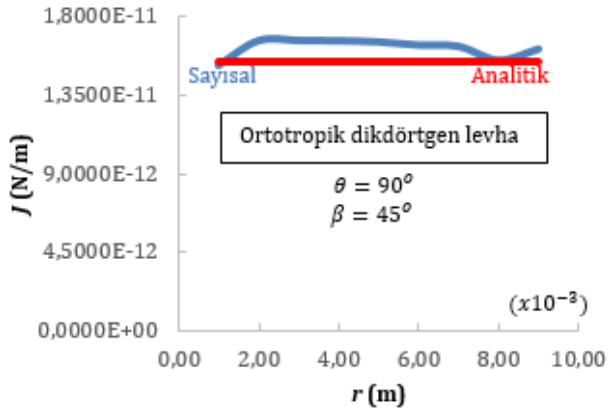
45° takviye açılı ve 45° merkez çatlaklı dikdörtgen numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J –integralin r ’ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren sonuçlar, Şekil 13’ te verilmiştir.



Şekil 13. $\theta = 45^\circ$ için Levha-II $J - r$ sonuçları.

Sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.090$ m'de % 0.1385 olarak tespit edilmiştir (Şekil 13).

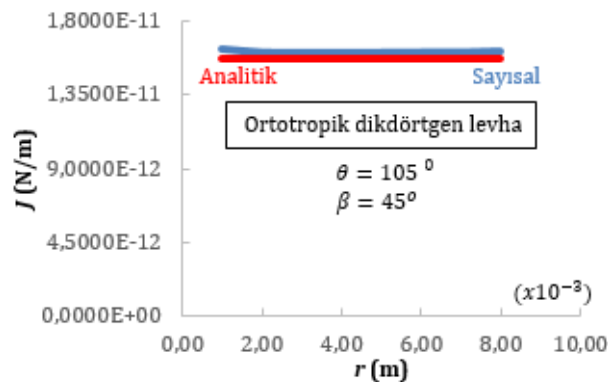
90° takviye açılı 45° merkez çatlaklı dikdörtgen numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J -integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları verilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. $\theta = 90^\circ$ için Levha-II $J - r$ sonuçları.

Şekil 14' teki grafik, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hatanın $r=0.0915$ m'de % 0.4829 olarak tespit edildiğini göstermektedir.

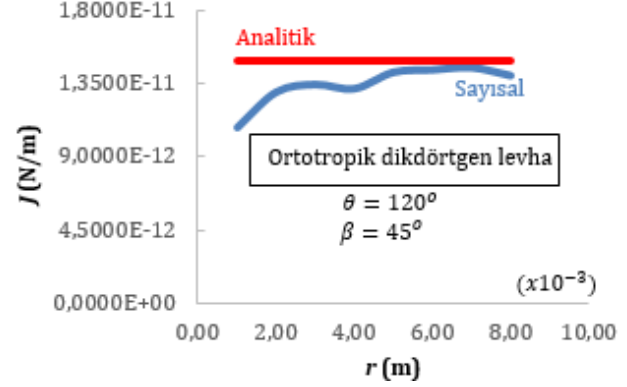
Şekil 15' te, 105° takviye açılı 45° merkez çatlaklı dikdörtgen numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J -integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 15. $\theta = 105^\circ$ için Levha-II $J - r$ sonuçları.

Şekil 15' teki grafiğe göre, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.010$ m'de % 1.9590 olarak tespit edilmiştir.

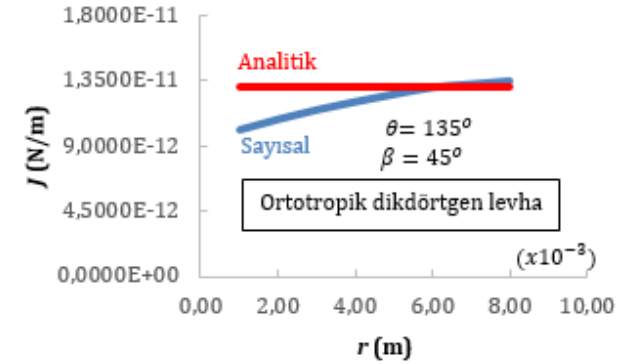
120° takviye açılı 45° merkez çatlaklı dikdörtgen numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J -integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları Şekil 16' da verilmiştir.



Şekil 16. $\theta = 120^\circ$ için Levha-II $J - r$ sonuçları.

Şekil 16' daki grafik, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hatanın $r=0.060$ m'de % 2.8149 olarak tespit edildiğini göstermektedir.

Şekil 17' de, 135° takviye açılı 45° merkez çatlaklı dikdörtgen numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J -integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları görülmektedir.



Şekil 17. $\theta = 135^\circ$ için Levha-II $J - r$ sonuçları.

Şekil 17' deki grafiğe göre, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.050$ m'de % 0.2978 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 7' de, merkez çatlaklı dikdörtgen numune için, sayısal ve analitik olarak elde edilen, J -integrali sonuçlarının minimum hata ile tespit edildiği değerler verilmiştir.

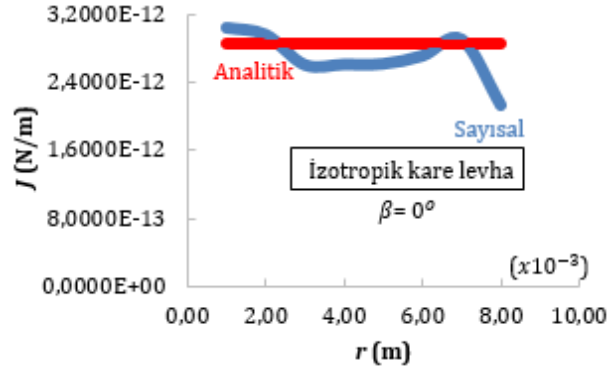
Çizelge 7. Levha -II J -integrali sonuçları için minimum hata miktarları.

Fiber yönelme açısı	r (m)	Sayısal (N/m)	Analitik (N/m)	Hata (%)	
θ	0°	0.0006	1.2158E-11	1.2044E-11	0.9440
	45°	0.0900	1.5217E-11	1.5239E-11	0.1385
	90°	0.0915	1.5460E-11	1.5386E-11	0.4829

105°	0.0100	1.6082E-11	1.5773E-11	1.9590
120°	0.0600	1.4480E-11	1.4899E-11	2.8149
135°	0.0500	1.3057E-11	1.3096E-11	0.2978

Çizelge 7' ye göre, merkez çatlaklı dikdörtgen numuneye ait sayısal ve analitik sonuçlar arasındaki % hatalar incelendiğinde, en büyük % hata, 120° takviye açılı numunede % 2.8149 olarak, $r=0.060$ m'de tespit edilirken, en küçük % hata 45° takviye açılı numunede % 0.1385 olarak, $r=0.090$ m'de tespit edilmiştir.

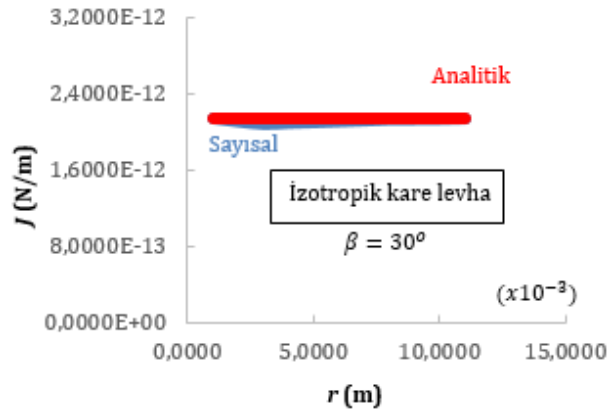
Şekil 18' de, $\beta = 0^\circ$ merkez çatlaklı kare numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J –integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları görülmektedir.



Şekil 18. $\beta = 0^\circ$ için Levha-III $J - r$ sonuçları.

Sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.0945$ m'de % 2.1373 olarak tespit edilmiştir (Şekil 18).

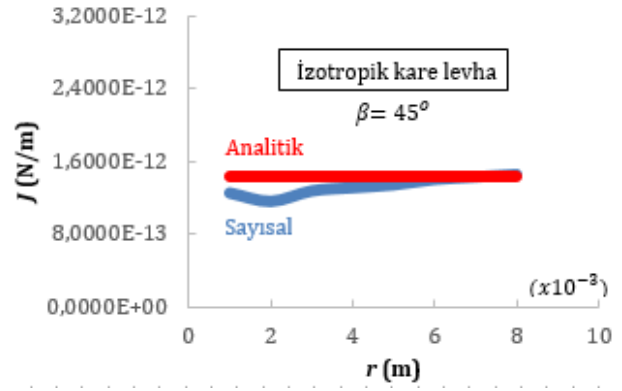
Şekil 19' da, 30° merkez çatlaklı kare numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J –integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 19. $\beta = 30^\circ$ için Levha-III $J - r$ sonuçları.

Şekil 19' daki grafiğe göre, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.047$ m'de % 0.0560 olarak tespit edilmiştir.

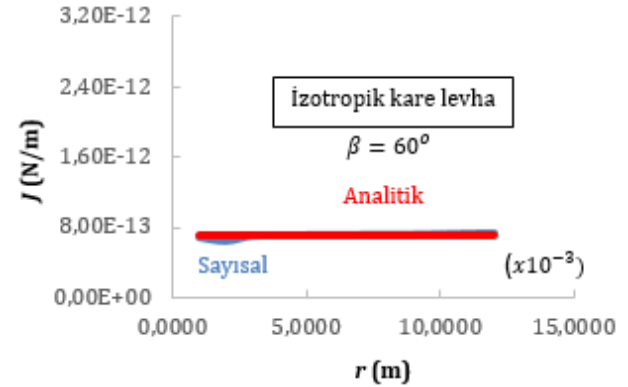
45° merkez çatlaklı kare numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J –integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları, Şekil 20' de verilmiştir.



Şekil 20: $\beta = 45^\circ$ için Levha-III $J - r$ sonuçları.

Şekil 20' deki grafik, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hatanın $r=0.030$ m'de % 0.7835 olarak tespit edildiğini göstermektedir.

Şekil 21' de, 60° merkez çatlaklı kare numuneye ait, analitik ve sayısal olarak elde edilmiş, J –integralin r 'ye göre değişimini grafiksel olarak gösteren çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 21. $\beta = 60^\circ$ için Levha-III $J - r$ sonuçları.

Şekil 21' deki grafiğe göre, sayısal ve analitik çalışma sonuçları arasındaki en düşük hata $r=0.418$ m'de % 0.0462 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 8' de, merkez çatlaklı kare numune için, sayısal ve analitik olarak elde edilen, J – integrali sonuçlarının minimum hata ile tespit edildiği değerler verilmiştir.

Çizelge 8. Levha-III J –integrali sonuçları için minimum hata miktarları.

Çatlak açısı	r (m)	Sayısal (N/m)	Analitik (N/m)	Hata (%)
0°	0.0945	2.9199E-12	2.8588E-12	2.1373
β 30°	0.0470	2.1453E-12	2.1441E-12	0.0560
45°	0.0300	1.4406E-12	1.4294E-12	0.7835
60°	0.4180	7.1438E-13	7.1471E-13	0.0462

Çizelge 8' e göre, merkez çatlaklı kare numuneye ait, sayısal ve analitik sonuçlar arasındaki % hatalar incelendiğinde, en büyük % hata, 0° çatlaklı numunede % 2.1373 olarak, $r=0.0945$ m'de tespit edilirken, en küçük % hata 60° çatlaklı numunede % 0.0462 olarak, $r=0.418$ m'de tespit edilmiştir.

6. Tartışma

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, sayısal ve analitik sonuçlar arasındaki en büyük % hata, 120° merkez çatlaklı dikdörtgen numunede % 2.8149 olarak, $r=0.060$ m’de tespit edilirken, en küçük % hata, 60° merkez çatlaklı kare numunede % 0.0462 olarak, $r=0.418$ m’de tespit edilmiştir. Bu % hata miktarları, Patil (2016) referansı ile kıyaslanırsa, referansta analitik ve nümerik değerler arasındaki en büyük % hata 8.57 olarak tespit edilmişken, en küçük % hata ise 5.37 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlendirme, çalışmamız sonucunda, ANSYS’de J –integrali kullanılarak elde edilen % hata miktarlarının kabul edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Yöntemin farklı ve karmaşık modellere ve tabakalı kompozitlere uygulanabilirliği incelenebilir.

7. Semboller ve Kısaltmalar Listesi

a :	Çatlak uzunluğu
S_{ij} :	Malzemenin elastik kompiyans katsayıları
S'_{ij} :	Dönüştürülmüş elastik kompiyans katsayıları
ds :	Eğri boyunca birim uzunluk artışı
E :	Elastisite Modülü
G :	Enerji yayılım hızı
G_{12} :	Kayma modülü
K :	Gerilme şiddet faktörü
K_C :	Kritik gerilme şiddet faktörü
K_I :	Mod-I’deki gerilme şiddet faktörü
K_{II} :	Mod-II’deki gerilme şiddet faktörü
Mod-I:	Çatlak açılma deformasyon tipi
Mod-II:	Çatlak kayma deformasyon tipi
H :	Numune yüksekliği
R :	Çatlak ucunu çevreleyen herhangi bir eğri
r :	J –integralin belirlendiği yolun yarıçapı
T_i :	Eğriye dik yöndeki gerilme vektörü
u_{ij} :	Yer değiştirme vektörü
β :	Çatlak açısı
σ :	Numuneye uygulanan gerilme
ν :	Poisson oranı
w :	Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu
W :	Numune genişliği
$[\bar{S}]$:	Dönüştürülmüş indirgenmiş esneklik matrisi
θ :	Fiber yönlenme açısı
$\eta_{jk,1}, \eta_{1,jk}$:	Birinci ve ikinci tür karşılıklı etki katsayıları

8. Kaynaklar

- Aleksic B., Milovic L., Grbovic A. and Hemer A., 2018. Experimental and numerical investigations of the critical values of J -integral for the steel of steam pipelines. *Procedia Structural Integrity*, **13**, 1589-1594.
- Balaban A.C. and Tee K.F., 2019. Strain energy release rate of sandwich composite beams for different densities and geometry parameters. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **101**,191-199.
- Chu S.J. and Hong C.S., 1990. Application of the J_k Integral to Mixed Mode Crack Problems for Anisotropic Composite Laminates. *Engineering Fracture Mechanics*, **35**, 1093-1103.
- Gibson R.F., 2012. Principles of Composite Material Mechanics. 13, CRC Press, 53-87.
- Griffith A.A., 1921. The Phenomena of Rubture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **221**, 163-197.
- Gu L. and Kasavajhala A.R.M., Zhao S., 2011. Finite Element Analysis of Cracks in Aging Aircraft Structures with Bonded Composite-Patch Repairs. *Composites: Part B*, **42**, 3, 505-510.
- Irwin G.R., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, **24**, 361-364.
- Lekhnitskii S.G., 1963. Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body. 17, Holden-Day, 15-73.
- Lei J., Xu Y., Gu Y. and Fan C., 2019. The generalized finite difference method for in-plane crack problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **98**, 147-156.
- Liu J. and Sawa T., 2000. Stress Analysis and Strength Evaluation of Single Lap Band Adhesive of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moment. *J. Of Adhesion Science and Technology*, **14**, 67-92.
- Özdemir A., 2006. Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Teorik Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 65.
- Patil K. and Wadageri C.S., 2016. Fracture Analysis for Steel and Epoxy Material Plate With Edge Crack”.

International Journal of Recent Trends in Engineering & Research, **2**, 2455-1457.

Rice J.R., 1968. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, **35**, 379-386.

Tan C.L. and Gao Y.L., 1992. Boundary Element Analysis of Plane Anisotropic Bodies with Stress Concentrations and Cracks, *Composite Structures*, **20**, 17-28.

Vavrik D. and Jandejsek I., 2014. Experimental evaluation of contour J integral and energy dissipated in the fracture process zone. *Engineering Fracture Mechanics*, **129**, 14-15.

Wang Y. and Sun Y., 2005. A new boundary integral equation method for cracked 2-D anisotropic bodies. *Engineering Fracture Mechanics*, **72**, 2128–2143.

Wen P. and Aliabadi M., 1995. A contour integral for the evaluation of stress intensity factors. *Appl. Math. Modelling*, **19**, 450-455.

Panik Frenleme Davranışının Yarım Taşıt Test Cihazında İncelenmesi

Hüseyin BAYRAKÇEKEN^{*1}, Tuğçe TÜRK BAY², Faruk Emre AYSAL³, Hicri YAVUZ⁴

^{1*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

⁴Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Raylı Sistemler Yol Teknolojisi Bölümü, Afyonkarahisar.

Sorumlu yazar *e-posta: bceken@aku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1572-4859>

tturkbay@aku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-9741>

faysal@aku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9514-1425>

hicriyavuz@aku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-5164>

Geliş Tarihi: 17.01.2020

Kabul Tarihi: 29.06.2020

Öz

Anahtar kelimeler

Panik Fren; Fren-Süspansiyon Test Cihazı; Frenleme Profili; Tam frenleme Mesafesi

Günlük hayatın vazgeçilmez unsurlarından biri olan taşıtlarda frenleme etkinliği en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışma panik frenleme esnasında fren pedal kuvveti değişikliğinin frenleme üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deneyler Afyon Kocatepe Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Laboratuvarında bulunan yarım taşıt modeli olarak kullanılan Fren-Süspansiyon Test Cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı yaş grupları ve cinsiyetlerden yirmi sürücünün panik frenleme davranışlarından elde edilen veri setleri incelenmiş ve ortak bir frenleme profili elde edilmiştir. Fren pedalı üzerine uygulanan kuvvet arttıkça fren iç hat basıncının, kaliperdeki basıncın, fren kuvvetinin arttığını ve tam frenleme mesafelerinin azaldığını göstermiştir. Yaş, kilo ve boy gibi parametrelerin frenleme profilini çok etkilemediği, ancak erkek sürücülerin kadın sürücülere oranla frenleme performanslarının daha iyi olduğu görülmüştür.

The Investigation of Emergency Brake Behaviour with Half Vehicle Test Device

Abstract

Keywords

Emergency Brake; Brake-Suspension Test Device; Braking Profile; Brake Distance

Braking event is an important parameter of the vehicles being an indispensable element of daily life. This study was conducted to determine the effect of changing the brake pedal force on braking during emergency brake. Experiments were carried out using Brake-Suspension Test Device which is used as a semi-vehicle model in the Automotive Engineering Application and Research Laboratory of Afyon Kocatepe University. Data sets obtained from panic braking behaviour of twenty drivers of different age groups and genders were examined and a common braking profile was obtained. The results showed that as the force applied on the brake pedal increased, the internal brake pressure increased, thereby the pressure in the calliper and brake force were increased and reducing stopping distances. It was found that parameters such as age, weight and height did not affect the braking profile much. However, it was found that male drivers had better braking performances than female drivers.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Fren sistemi, araç güvenlik sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Sürücünün aracında taşıdığı diğer yolcuların, yayaların, kendinin ve trafikteki diğer sürücülerin can güvenliğini sağlaması için fren sistemi hayati önem taşımaktadır. Taşıt

performansında görülen artışlar frenleme performansı ve etkinliğinin artırılmasını son derece önemli bir konu haline getirmiştir. Günümüzde fren sistemleri için mekanik, hidrolik, pnomatik ve elektrikli hava tahrikli fren sistemi olmak üzere farklı çeşitler mevcuttur. Daha iyi bir frenleme verimi elde

etmek için fren sisteminin elemanlarında ve sistemin bütününde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir (Albatlan, 2012; Ryzhikov ve Batyshchev, 2017).

Fren sistemi etkinliği ve performansı üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı fren sistem ve elemanları üzerine olurken bir kısmı da fren pedal kuvveti ve araçların durma mesafesi üzerine yapılmıştır (Sun vd., 2015).

Yayaların araç hızını ve durma mesafesini doğru tahmin edebilmesi, yayaların güvenli şekilde karşıdan karşıya geçme kararı verebilmeleri için önemlidir. Sun vd. yaptıkları çalışmada, yayaların karşıdan karşıya geçerken araçların hızları ve durma mesafeleri hakkındaki tahminlerini ölçmek için doğal bir trafik ortamında bir saha deneyi yapmışlardır. Kırk dört katılımcı (18-45 yaş) 1043 araca ilişkin tahminlerini bildirmiş ve buna karşılık gelen gerçek araç hızı ve durma mesafesi kaydedilmiştir. Yayaların hız tahminleri farklı hız seviyelerinde ve farklı hava durumlarında değişmektedir. Güneşli durumlarda yayalar, 40 km/s'den daha düşük hızları doğru bir şekilde tahmin edebilirken bu değerlerin üzerindeki gerçek araç hızlarını hafife alma eğilimindedir. Yağmurlu durumlarda yayalar 35 km/s ile 45 km/s arasındaki hızları doğru tahmin edebilirken 45 km/s'den daha yüksek olan gerçek araç hızlarını hafife alma eğilimindedir. Yayaların 65 km/s üzerinde seyahat eden araçların durma mesafesini genellikle doğru tahmin edemediği görülmüş ve karşıdan karşıya geçerken risk faktörünün attığı belirlenmiştir. Bu durum araçların panik fren esnasında durma mesafelerinin ne kadar hayati önem taşıdığını göstermektedir (Sun vd., 2015).

Sürücülerin kazadan kaçınmak için bazen agresif ve ani bir şekilde fren yapmaları gereklidir. Bu durum sonucunda yol şartları, lastik vb donanımların uygun olması halinde araç hızı daha kısa sürede azaltılabilmektedir. Frenleme davranışı üzerinde etkili olan ortalama fren pedal kuvveti, frenleme tipi (sürekli veya kademeli), fren pedalı konumu, fren pedalı itme mesafesi, fren gecikmesi vb parametrelerin hakkında birçok araştırma

yapılmıştır. Pawar vd. yaptıkları çalışmada sürücülerin frenleme davranışlarını ve kaza olasılıklarını analiz etmişlerdir. Yaya geçidi ve engel gibi ani frenleme gerektiren iki durum için bir sürüş simülatöründe fren pedalı kuvveti ve maksimum frenleme geçiş süresini incelenmiştir. 59 erkek ve 26 kadın sürücünün katıldığı deneyde cinsiyet, yaklaşım hızı, yaş, sürüş geçmişi ve sürüş koşullarının sürücülerin frenleme davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Pawar vd. 2020). Yadav vd. kanlarındaki alkol oranları değişen 82 sürücü ile yaptıkları yol testinde kandaki alkol oranının artmasının sürücünün fren ve gaz pedalına uyguladıkları kuvvet büyüklüğünün değiştirdiğini göstermiştir (Yadav 2019).

Deepa vd. fren pedalı oranı normal ve panik frenleme anlarında dinamik olarak değiştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Normal frenleme; fren pedalı üzerindeki kuvvetin kademeli olarak, panik fren ise acil durum esnasında ani bir kuvvet ile fren pedalına basmak olarak tanımlanmıştır. Elde edilen yeni dizaynın elektronik kontrollü sistemlere göre ucuz bir kontrol yöntemi olduğunu öne sürmüşlerdir (Deepa vd. 2018)

Düzgün vd. (2005) taşıtlardaki frenleme mesafesini tespit etmek için yol testleri yapmışlardır. Test aracı 50, 80, 90 ve 120 km/s hızlarda kullanılmış ve 60, 120, 180, 240, 300, 350 N pedal kuvvetlerinde frenlemeler yapılarak durma mesafeleri ve süreleri ölçülmüştür. Deney sonuçları aynı hız değerlerinde fren pedalına uygulanan kuvvet arttıkça fren mesafesinin azaldığını göstermiştir. Hız değerleri yükseldikçe fren mesafesinde artış görülmüştür.

Fambro vd. (2000) ıslak ve kuru yol şartlarında ABS'li (Anti-Lock Braking System) ve ABS'siz durum için farklı hızlardayken panik fren testleri yapmışlardır. ABS kullanımının hem ıslak hem de kuru yol şartlarında durma mesafesini %10 ile %15 oranında azalttığı görülmüştür.

Taşıtlarında panik frenleme esnasında fren pedalına uygulanan kuvvetin yeterli olmadığı görülmüştür. Direksiyon hâkimiyeti ve aracın en kısa mesafede durmasını sağlayan tekerlek kilitlemesi

önleyici fren sisteminin devreye girmesi için tekerleklerle yeterli azami fren gücü iletilmemektedir. Bu nedenle panik frenlemeyi algılayan acil fren destek sistemi araçlarda kullanılmakta ve tekerlekler için gerekli azami fren basıncı elde edilebilmektedir (Çavdar ve Bayrakçeken, 2006).

Bu çalışmada, Afyon Kocatepe Üniversitesi'ndeki Fren-Süspansiyon Test Cihazı (FSTC) kullanılarak değişik yaş grupları ve cinsiyetlerden oluşan yirmi farklı sürücünün panik frenleme durumundaki frenleme profili elde edilerek fren mesafeleri, fren pedal kuvveti, fren iç hat basıncı arasındaki ilişki incelenmiştir. Yarım taşıt test cihazı olarak tasarımı yapılmış olan FSTC'den elde edilen verilerin gerçek taşıtlara uygulanabilirliğini ortaya koymak amacıyla bir düzeltme algoritması kullanılmıştır. Uygulanan algoritma sonucunda elde edilen veriler literatürle karşılaştırılarak bu yaklaşımın güvenilirliği incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Taşıtlarda frenleme performansını belirleme amacıyla yapılan fren testlerinde, fren test cihazları ile pedal kuvveti, fren basıncı, frenleme yüzeyi sıcaklığı, taşıtın ağırlığı, taşıtın hızı, lastik hava basıncı gibi parametrelerin frenleme esnasında taşıta etkileri deneysel olarak incelenebilmektedir. Laboratuvar ortamında birçok değer sabit tutularak sadece istenilen veri seti değiştirilebilmektedir. Taşıtlarda fren kuvvetlerinin tespitinde genellikle tamburlu tip elektromekanik fren test cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazlarda tamburları tahrik eden bir elektrik motoru bulunmaktadır. Taşıt test cihazının tamburlarının üzerine geldiğinde elektrik motorundan sağlanan tahrik kuvvetiyle tamburlar dönmeye başlamaktadır. Taşıt çalışır durumda ve vites boşta iken gerçekleştirilen frenlemeyle tamburlara frenleme yapılmaktadır. Frenleme esnasından oluşan frenleme kuvveti tambura bağlı bulunan yük hücresi yardımıyla ya da hidrolik sistemle ölçülerek taşıtın frenleme kuvveti-momenti hesaplanabilmektedir. Bunun dışında taşıtlarda frenleme performansını belirlemek için düz zeminli test platformları da kullanılmaktadır. Bu testlerde

taşıt platformun üzerinde 8 km/s hızda sürüklenerek sertçe frenlenmektedir. Ancak tamburlu ve düz zeminli test cihazları yapılacak AR-GE çalışmalarında yeterli hassasiyeti ve istenilen şartları sağlayamamaktadır (Bayrakçeken, 2002). Dolayısıyla birçok araştırmacı laboratuvar ortamında daha hassas fren testleri yapmak amacıyla çeşitli test cihazları geliştirmiştir. Bu çalışmada son yıllarda geliştirilen test cihazlarından biri olan FSTC deneylerin yapılması için kullanılmıştır (Bayrakçeken vd., 2016).

Gerçekleştirilen deneylerde kullanılan FSTC Şekil 1'de görülmektedir. Deneylerin yapıldığı ortamın sıcaklığı 25 °C olarak ölçülmüştür. Bir yarım taşıt modeli olarak geliştirilen FSTC'de kullanılan içten yanmalı motor ile lastiklerin özellikleri Tablo 1'de belirtilmiş ve cihazın genel test prosedürüyle çalışma şekli Bayrakçeken vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada ayrıntılı olarak açıklanmıştır. FSTC cihazında sürücü ve operatör olmak üzere en az 2 kişi ile deneyler gerçekleştirilmekte, deney grafikleri oluşturulabilmekte, motor ve balata sıcaklıkları, pedal basıncı gibi parametreler eş zamanlı olarak kaydedilmektedir. Deney verileri; fren sistemi basınç değerleri, fren kuvveti değerleri, tekerlek tambur devri eş zamanlı olarak cihaz tarafından 0.1 saniye aralıklarla kaydedilmektedir.

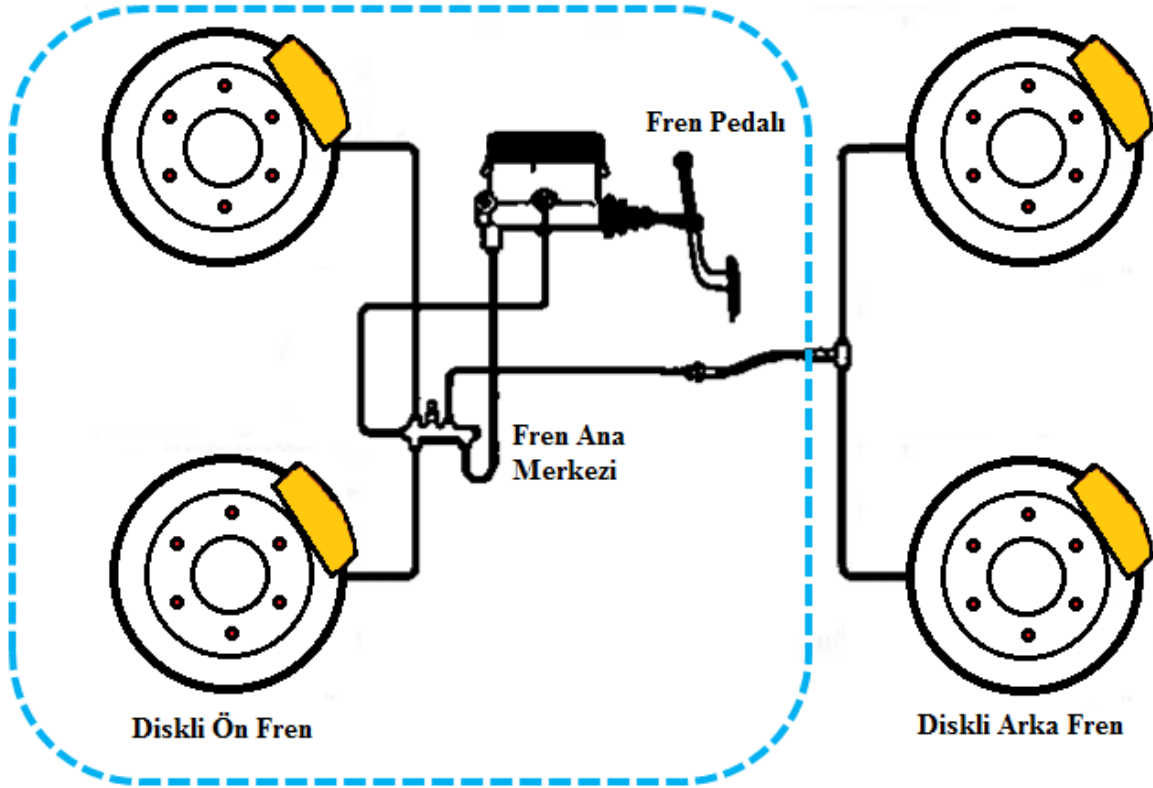
Çizelge 1. Fren Süspansiyon Test Cihazının Özellikleri.

Test Cihazının Özellikleri	
İçten Yanmalı Motor	4 Silindirli, Benzinli Motor
Motor Hacmi	1.4 L
Motorun Maksimum Gücü	57 kW
Motorun Maksimum Torku	115 Nm
Lastik Bilgileri	175/70R14
Tambur Yarı Çapı	0.15 m

Fren pedalına bağlı bulunan yük hücresi sayesinde fren pedalına basma kuvveti ve fren ana merkezi çıkışına bağlı bulunan manometre yardımıyla fren hattı basıncı frenleme esnasında ölçülmektedir [8]. Şekil 2'de FSTC'de kullanılan fren sistemi kesik (mavi) çizgiler içerisinde olacak şekilde şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Fren süspansiyon test cihazı



Şekil 2. FSTC'deki fren sisteminin şematik görünümü

FSTC'nin sabit ataleti toplam 160 kg kütlesindeki tamburlar ve tekerlekler ile sağlanmaktadır. Burada FTSC'nin kütleli ataleti değerlendirilirken krank mili, volan, şanzıman mili, diferansiyel ve aksların kütle etkisi ihmal edilmiştir. Dolayısıyla, FSTC ile yapılan çalışmalar fren mesafesi ve frenleme ivmesi açısından "Gerçek Taşıtlar" için doğrudan eşdeğer sonuçlar sağlamamaktadır. Ancak FSTC'den elde edilen veriler ile yol testlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak verilerde bir korelasyon yapılması mümkündür. FSTC'den elde edilen veriler doğrudan Ar-Ge çalışmalarına önemli bir bakış açısı sağlamaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde taşıtlarda gerçek frenlemenin reaksiyon süresi, tahrik yükselme süresi, cevap süresi, sistem yükselme süresi ve tam frenleme süresi olarak çeşitli aşamaları bulunmaktadır. Gerçek taşıtlarda frenleme esnasında maksimum yavaşlama ivmesine sistem yükselme süresinin sonunda ulaşılmaktadır (Göktan vd., 1995). Bu nedenle, gerçek taşıtlar ile FSTC arasında sağlıklı bir korelasyon kurulabilmesi için maksimum yavaşlama ivmesinin sağlandığı tam frenleme süresi dikkate alınarak tam frenleme mesafesi hesaplanmıştır. Dolayısıyla reaksiyon süresi, tahrik yükselme süresi, cevap süresi ve sistem yükselme süresi hesaplamaya katılmadan yalnızca tam frenleme süresi dikkate alınmıştır. Frenleme ivmesi ile atalet momenti arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için denklem 1'de verilen açısal ivme yalnız bırakılıp denklem 2'de yerine yazılarak denklem 3 elde edilmiştir. Burada; F_{fr} tekerlek ile zemin arasındaki sürtünme kuvvetini, R tekerlek yarıçapını, I kütleli atalet momentini, α açısal ivmeyi, a çizgisel ivmeyi ifade etmektedir.

$$F_{fr} * R = I * \alpha \quad (1)$$

$$a = R * \alpha \quad (2)$$

FSTC sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için Bayrakçeken ve Düzgün (2005) tarafından yapılan çalışmadaki gerçek taşıt verileri bu çalışmada referans olarak kullanılmıştır. Referans çalışmada gerçek bir taşıt için durma mesafesi; reaksiyon mesafesi ve tam duruma mesafesi ayrı ayrı olacak

şekilde hesaplanmıştır. Bu nedenle referans çalışmadaki gerçek taşıtın 60 km/s hız için tam durma mesafesi ile reaksiyon mesafesinin farkı alınarak ortalama tam frenleme mesafesi hesaplanmıştır. Referans çalışmadaki veriler 1200 kg kütlesindeki bir araç için geçerlidir. Dolayısıyla denklem 3 ve 4 kullanılarak 1200 kg kütleli bir araç ile FSTC'nin ivmesi arasındaki benzerlik oranı " θ " hesaplanmıştır. Denklem 3'ten görüldüğü gibi tam frenleme süresindeki yavaşlama ivmesi ile atalet momenti arasında ters orantı mevcuttur. Burada " θ " ifadesi diğer bir deyişle "FSTC yavaşlama ivmesi ve gerçek taşıt yavaşlama ivmesi arasındaki düzeltme faktörünü" ifade etmektedir. Denklem 3 ve 4 sadeleştirildiğinde ise düzeltme faktörü gerçek taşıtın atalet momentinin FSTC'nin atalet momentine oranı olarak elde edilebilir. Dolayısıyla 1200 kg kütleli taşıt için FSTC tam yavaşlama ivmesi düzeltme faktörü " $\theta=3.75$ " olarak elde edilmektedir.

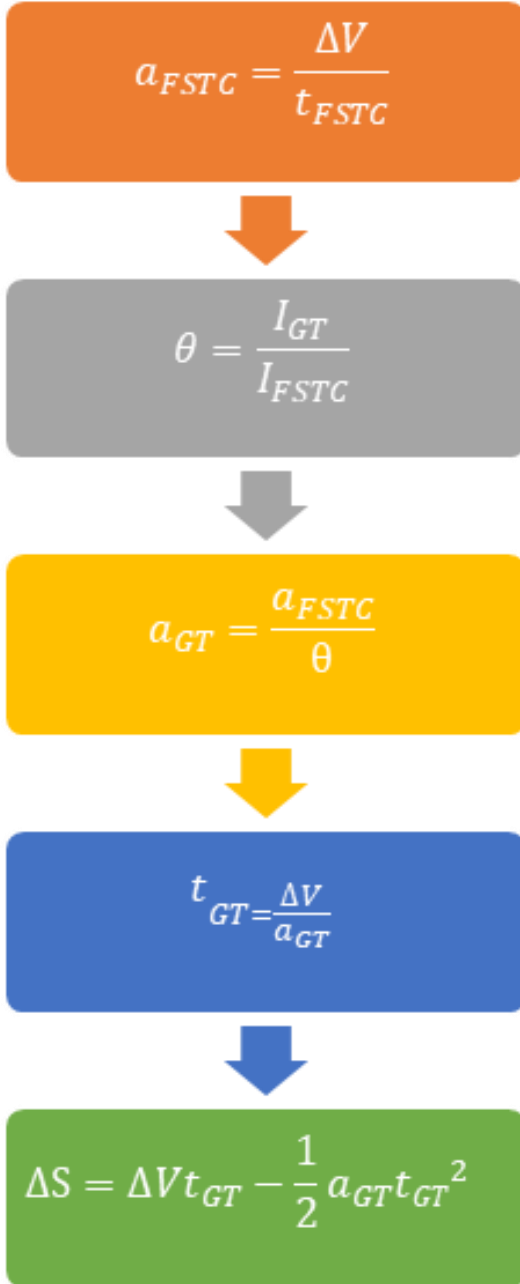
$$a = \frac{F_{fr} * R^2}{I} \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{2} m R^2 \quad (4)$$

FSTC'nin tam frenleme mesafesi hesaplanırken bilgisayar ortamına eş zamanlı kaydedilen veriler kullanılmıştır. Fren pedalına basıldıktan sonra fren iç hat basıncında ilk basınç artışının meydana geldiği an taşıtın yavaşlamaya başladığı referans zamanı kabul edilmiştir. Bu esnadaki tamburların sahip olduğu açısal hız ile bu aşamadan sonra tamburlar tamamen durana kadar geçen süre tam frenleme süresi olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 3'te FSTC ile elde edilen yavaşlama ivmesi verileri ve düzeltme faktörü " θ " kullanılarak gerçekleştirilen "düzeltilmiş tam frenleme mesafesi hesap algoritması" verilmiştir. Şekil 3'te verilen algoritmanın ilk adımında görüldüğü gibi FSTC'nin hız değişimi ve tam frenleme süresi arasındaki bağıntı kullanılarak FSTC'nin tam frenleme ivmesi hesaplanmaktadır. Sonrasında FSTC ile gerçek taşıt arasındaki atalet momentleri oranı kullanılarak

düzeltilme faktörü hesaplanmaktadır. Algoritmanın üçüncü adımında gerçek taşıt tam frenleme ivmesini hesaplamak için FSTC'nin tam frenleme ivmesi düzeltilme faktörüne bölünmektedir. Sonraki adımda gerçek taşıt tam frenleme ivmesi kullanılarak Newton'un fizik yasaları uyarınca gerçek taşıt için olması gereken tam frenleme süresi elde edilmektedir. Şekil 3'teki algoritma da görüldüğü gibi gerçek taşıt tam frenleme mesafesi elde edilen düzeltilmiş veriler kullanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3. FSTC – Gerçek Taşıt Tam Fren Mesafesi Düzeltme Algoritması

Deneylerde FTSC tam frenleme mesafesinin sadece fren pedalına uygulanacak kuvvete bağlı olması

amacıyla balatalar her deneyden sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Balata sıcaklığı stabil hale geldikten sonra diğer teste başlanmıştır. Böylece balata sıcaklığının frenlemeye termomekanik etkisi her deneyde sabit kalmıştır.

Yapılan çalışmada, farklı yaş grupları ve cinsiyetlerden oluşan yirmi farklı sürücünün panik frenleme davranışlarından ortak bir frenleme profili elde edilerek tam frenleme mesafeleri, fren pedal kuvveti ve fren iç hat basıncı arasındaki ilişki incelenmiştir. On kadın ve on erkek sürücü ile aynı şartlarda ve ayrı ayrı yapılan deneylerde iki farklı durum göz önüne alınmıştır.

FSTC simülatörü 4. vites 3000 d/d devirde 60 km/s hızda el gazı ile sabitlenmiş ve 40 saniyelik sürüş sonrasında sürücülerden yalnızca fren pedalına basarak panik frenleme yapmaları istenmiştir. Sonrasında ise sürücülerden aynı test prosedürünü tekrar gerçekleştirmeleri ancak bu deneyde fren pedalına debriyaj ile aynı anda basmaları istenmiştir. Kadın sürücülerin yaşları ve fiziksel özellikleri Çizelge 2'de, erkek sürücülerinki ise Çizelge 3'te verilmiştir. Kadın sürücüler K harfleri ile erkek sürücüler E harfleri ile kodlanmıştır.

Çizelge 2. Kadın Sürücülerin Özellikleri

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
Yaş	21	20	20	29	20	33	20	29	20	21
Kilo (kg)	45	57	48	57	62	63	62	57	75	54
Boy (cm)	164	163	162	164	168	160	170	160	167	160

Çizelge 3. Erkek Sürücülerin Özellikleri

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Yaş	21	28	23	21	36	21	24	39	28	45
Kilo (kg)	76	80	62	89	75	106	73	108	121	115
Boy (cm)	178	175	167	172	174	190	178	178	186	181

3. Bulgular

On kadın ve on erkek sürücü ile yapılan deney sonuçları Çizelge 5 ve Çizelge 6'da gösterilmiştir. Çizelgede fren pedalı üzerine uygulanan kuvvet F_{pedal} , fren iç hat basıncı F_{ib} , FSTC'den elde edilen tam frenleme süresi t_{FSTC} , FSTC'nin yavaşlama ivmesi a_{FSTC} , FTCS'nin tam fren mesafesi S_{FSTC} ile gösterilmiştir. FSTC ile 1200 kg'lık bir taşıtın atalet momentleri oranından hesaplanan gerçek taşıt düzeltilmiş yavaşlama ivmesi a_{GT} , gerçek taşıt düzeltilmiş tam frenleme süresi t_{GT} , gerçek taşıt düzeltilmiş tam fren mesafesi S_{GT} ile ifade edilmiştir.

Çizelge 4. Bayrakçeken ve Düzgün (2005) 60 km/s Hız için Durma Mesafesi- İvme

Frenleme öncesi taşıt hızı (km/h)	
60 km/h	
İvme (m/s)	1 s reaksiyon süresinde alınan yol (m)
Toplam durma mesafesi (m)	
4.4	48
5	44
5.8	40
7	36
8	34
9	32

Bayrakçeken ve Düzgün (2005) tarafından yapılan çalışmada 60 km/s taşıt hızı için sunulan frenleme mesafeleri ve ivmeleri Çizelge 3'te verilmiştir. Bu referans çalışmada yavaşlama ivmesinin ara değerleri bulunmamaktadır. Dolayısıyla düzeltme

algoritması ile hesaplanan a_{GT} değerlerinin tam karşılığı referans çalışmada yoktur. Referans çalışmadaki yavaşlama ivmesi ve mesafesi arasında interpolasyon yapılarak gerekli ara değerler bulunmuştur. Referans çalışmanın verileri arasında yapılan interpolasyon sonucunda elde edilen tam durma mesafeleri Çizelge 5 ve 6'da S_{GT-BVD} ile gösterilmiştir.

Çizelge 5 ve 6'ya göre fren iç hat basıncındaki ilk artışın meydana geldiği andan itibaren debriyajsız testlerde ortalama 0.78 saniye, debriyajlı testlerde ortalama 0.69 saniye içerisinde tekerlekler durdurulmuştur. Fren pedal kuvvetinin maksimum değerleri bu süreler içinde görülmüştür (Göktaş vd., 1995). Kadın sürücülerin genel tam frenleme süresi ortalaması 0.77 s, erkeklerin 0.705 s'dir. Kadın sürücülerin tam frenleme süresinin daha fazla olduğu görülmüştür (Pawar vd. 2020). Debriyajsız durumda fren mesafesi ortalama 13.55 metre olarak, debriyajlı durumda ise ortalama 11.97 metre olarak hesaplanmıştır. Kadın ve erkeklerin debriyajsız testlerde fren pedalına uyguladıkları kuvvet ortalama 279 N iken debriyajlı testlerde %16'lık bir azalık göstererek 234 N'a düşmüştür. Fren pedalına uygulanan kuvvetteki düşüşe rağmen debriyaj pedalına basılması ile motordan gelen atalet kesilmiş ve tam frenleme mesafesinde ortalama %12'lik bir düşüş sağlanmıştır. Fren pedalına uygulanan kuvvet arttıkça fren iç hattı basıncının arttığı görülmüştür.

Çizelge 5. Erkek Sürücülerin Panik Fren Verileri

Debriyajsız	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
F _{Pedal} (N)	211.36	255.91	269.89	283.59	295.34	305.21	326.25	352.73	371.03	382.98
F _{ib} Fren İç Hat Basıncı (bar)	31.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	33.00	33.00	33.00	33.00
t _{FSTC} (s)	0.88	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.74	0.73	0.72	0.72
a _{FSTC} (m/s ²)	18.97	21.78	21.88	22.06	22.09	22.20	22.65	22.98	23.12	23.25
S _{FSTC} (m)	7.33	6.38	6.35	6.30	6.29	6.26	6.13	6.05	6.01	5.97
a _{GT} (m/s ²)	5.06	5.81	5.83	5.88	5.89	5.92	6.04	6.13	6.17	6.20
t _{GT} (s)	3.30	2.87	2.86	2.83	2.83	2.82	2.76	2.72	2.70	2.69
S _{GT} (m)	27.47	23.93	23.82	23.62	23.58	23.47	23.00	22.68	22.53	22.41
S _{GT-BVD} (m)	26.71	22.98	22.89	22.72	22.69	22.60	22.20	21.91	21.78	21.66
Yüzde Bağlı Hata	2.77	3.97	3.90	3.79	3.77	3.71	3.49	3.38	3.35	3.32
Debriyajlı	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
F _{Pedal} (N)	178.51	205.88	245.71	261.26	239.94	267.09	279.30	305.42	328.64	340.36
F _{ib} Fren İç Hat Basıncı (bar)	31.00	31.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	33.00	33.00
t _{FSTC} (s)	0.77	0.71	0.66	0.64	0.67	0.63	0.62	0.61	0.60	0.60
a _{FSTC} (m/s ²)	21.61	23.42	25.33	26.05	24.87	26.29	26.91	27.28	27.57	27.57
S _{FSTC} (m)	6.43	5.93	5.49	5.33	5.59	5.28	5.16	5.09	5.04	5.04
a _{GT} (m/s ²)	5.76	6.25	6.75	6.95	6.63	7.01	7.17	7.27	7.35	7.35
t _{GT} (s)	2.89	2.67	2.47	2.40	2.51	2.38	2.32	2.29	2.27	2.27
S _{GT} (m)	24.11	22.24	20.57	20.00	20.95	19.82	19.37	19.10	18.90	18.90
S _{GT-BVD} (m)	23.19	21.51	19.82	19.18	20.23	18.98	18.65	18.45	18.30	18.30
Yüzde Bağlı Hata	3.83	3.29	3.66	4.12	3.46	4.24	3.69	3.40	3.19	3.19
Tam Fren Mesafesindeki Değişim (%)	12.24	7.03	13.63	15.31	11.16	15.58	15.81	15.77	16.12	15.64

Çizelge 5 ve 6'dan a_{FSTC} değerleri incelendiğinde gerçek bir taşıtın yavaşlama ivmesine göre oldukça yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. FSTC'nin frenleme sürecinde atalet etkisi olarak 160 kg'lık kütleli etkili olması yavaşlama ivmesinin gerçek taşıt değerlerinden yüksek olması ile sonuçlanmasına neden olmuştur. Korelasyon sonucu elde edilen düzeltilmiş a_{GT} değerleri gerçek taşıt için makul sınırlar içerisindedir (Bayrakçeken ve Düzgün 2005). 60 km/s hıza sahip gerçek taşıt için hesaplanan a_{GT} ile düzeltilmiş tam frenleme

mesafesi hesaplanarak, S_{GT}, referans çalışma ile sonuçlar arasındaki bağlı hata yüzdeleri Çizelge 5 ve 6'da verilmiştir. Erkek sürücüler için debriyajsız test durumdaki ortalama bağlı hata %3.55, debriyajlı durumdaki test için %3.61; kadın sürücüler için ise bu değerler sırasıyla % 3.09 ve % 3.60 olarak hesaplanmıştır. Bütün test sonuçları beraber değerlendirildiğinde ise 60 km/s taşıt hızı için FSTC'ye uygulanan düzeltme algoritmasının bağlı hatasının % 3.46 olduğu görülmüştür.

Çizelge 6. Kadın Sürücülerin Panik Fren Verileri

Debriyajsız	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
F_{Pedal} (N)	212.81	218.93	222.39	223.42	232.13	234.50	242.29	296.65	319.37	323.88
F_{ib} Fren İç Hat Basıncı (bar)	31	31	31	31	31	31	32	32	32	32
t_{FSTC} (s)	0.87	0.86	0.85	0.85	0.84	0.83	0.78	0.75	0.75	0.74
a_{FSTC} (m/s^2)	19.08	19.47	19.66	19.71	19.78	19.98	21.37	22.09	22.30	22.38
S_{FSTC} (m)	7.28	7.14	7.07	7.05	7.02	6.95	6.50	6.29	6.23	6.21
a_{GT} (m/s^2)	19.08	19.47	19.66	19.71	19.78	19.98	21.37	22.09	22.30	22.38
t_{GT} (s)	3.28	3.21	3.18	3.17	3.16	3.13	2.93	2.83	2.80	2.79
S_{GT} (m)	27.31	26.76	26.50	26.44	26.34	26.08	24.38	23.59	23.37	23.28
S_{GT-BVD} (m)	26.57	26.04	25.78	25.73	25.63	25.36	23.51	22.70	22.51	22.44
Yüzde Bağlı Hata	2.74	2.70	2.70	2.71	2.71	2.75	3.59	3.77	3.66	3.62
Debriyajlı	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
F_{Pedal} (N)	155.13	166.15	185.28	170.11	187.48	195.21	189.07	253.37	262.36	261.62
F_{ib} Fren İç Hat Basıncı (bar)	30.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	31.00	32.00	32.00	32.00
t_{FSTC} (s)	0.82	0.80	0.76	0.79	0.75	0.73	0.74	0.65	0.64	0.64
a_{FSTC} (m/s^2)	20.22	20.74	22.01	21.01	22.13	22.69	22.39	25.72	26.05	26.05
S_{FSTC} (m)	6.87	6.70	6.31	6.61	6.28	6.12	6.21	5.40	5.33	5.33
a_{GT} (m/s^2)	5.39	5.53	5.87	5.60	5.90	6.05	5.97	6.86	6.95	6.95
t_{GT} (s)	3.09	3.01	2.84	2.97	2.82	2.76	2.79	2.43	2.40	2.40
S_{GT} (m)	25.76	25.12	23.67	24.80	23.55	22.97	23.27	20.26	20.00	20.00
S_{GT-BVD} (m)	25.03	24.34	22.77	23.98	22.66	22.17	22.43	19.47	19.18	19.18
Yüzde Bağlı Hata	2.83	3.09	3.82	3.28	3.75	3.48	3.61	3.89	4.12	4.12
Tam Fren Mesafesindeki Değişim (%)	5.68	14.09	6.13	10.66	6.23	10.62	11.94	4.55	14.13	14.40

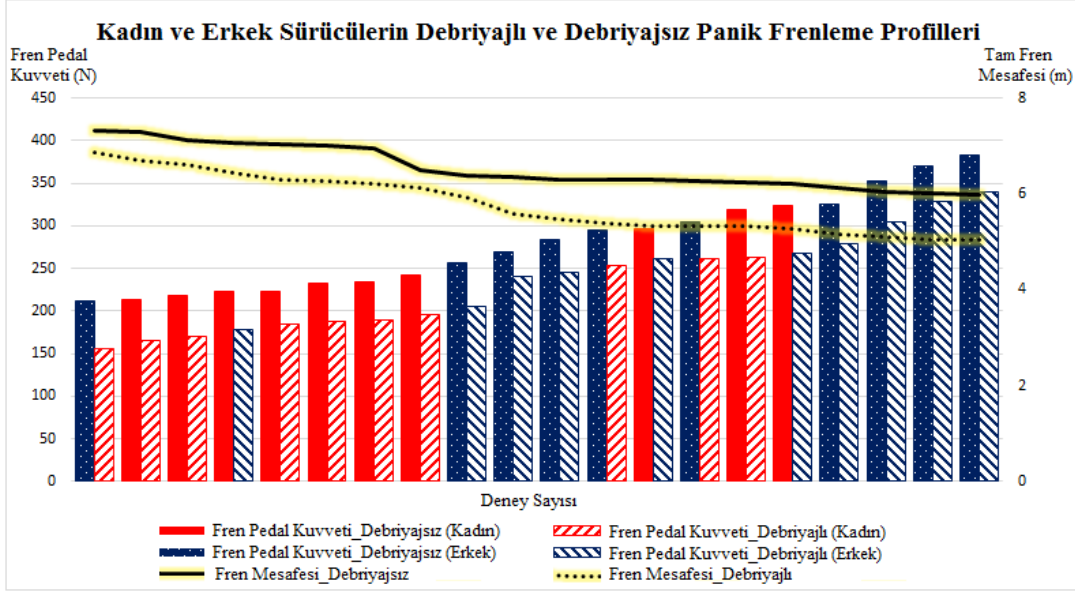
Yapılan deney sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Debriyajsız fren pedalına uygulanan kuvvetler küçükten büyüğe göre sıralanacak şekilde x ekseninde sütun ile gösterilmiştir. Kesik sütun ile gösterilen veriler debriyajlı test durumundaki fren pedal kuvvetleridir. Kadın sürücüler kırmızı, erkek sürücüler mavi renklerle vurgulanmıştır ve değerler sağ y ekseninden okunacak şekilde verilmiştir. İlgili fren pedal kuvvetinin uygulandığı durumdaki tam frenleme mesafesi değerleri ise sol y ekseninden okunacak şekilde çizgisel olarak ifade edilmiştir.

Sadece fren pedalına basılarak yapılan test sonuçları düz renklerle gösterilirken debriyajlı panik fren sonuçları kesikli çizgilerle vurgulanmıştır. Her iki deney sonucunda da fren pedalına uygulanan kuvvet arttıkça fren mesafesinde azalma görülmüştür (Surblyt ve Sokolockij, 2015).

Sürücülerin fren ve debriyaj pedallarına aynı anda bastığı ikinci deney durumunda fren pedalı üzerine uygulanan kuvvette düşüş görülmüştür. Buna ek olarak debriyaj ve fren pedalına basılarak yapılan

panik fren durumunda motordan gelen güç aktarımının kesilmesi sayesinde ilk duruma göre tam frenleme mesafesinde belirgin bir azalış olduğu Şekil 4'de görülmektedir.

Kadın sürücülerin genel olarak grafiğin fren mesafesinin yüksek olduğu yerde toplandığı görülmüştür. Bu durum fren pedalına erkeklere oranla daha az kuvvet uygulamalarıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4. Fren pedal kuvvetinin panik fren esnasında tam frenleme mesafesine etkisi

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada fren pedal kuvvetinin frenleme mesafesine etkisi incelenmiş, eşit sayıdaki kadın ve erkek sürücü tarafından deneyler gerçekleştirilerek iki cinsiyet arasındaki frenleme profilinde fark olup olmadığı araştırılmıştır. Erkek ve kadın sürücülerin pedala uyguladıkları tüm kuvvetlerin ortalaması alındığında, erkek sürücülerin ortalama pedal kuvvetinin kadın sürücülerin ortalamasına göre %25 daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu durum erkek ile kadın arasındaki fiziksel farkla ilişkilendirilmiştir. Bu kuvvet farkının tam frenleme mesafesi üzerinde etkisi olduğu deney sonuçlarında görülmüştür. İlave sistemlerle (Panik fren destek sistemi vb) taşıtlardaki frenleme daha efektif hale getirilse de sürücü faktörü hala frenleme performansında oldukça önemli olduğu gözlenmiştir.

- Yapılan testlerde debriyaj pedalı ile motordan gelen ataletin kesilmesi sayesinde debriyajlı frenleme durumunda fren mesafesinde genel olarak debriyajsız duruma göre ortalama %12 oranında bir düşüş elde edilmiştir.

- Aynı sürücü ile yapılan testlerin debriyajsız olanında fren pedalına uygulanan kuvvetin debriyajlı olana göre daha yüksek olduğu tüm test durumlarında görülmüştür.
- Fren pedalına uygulanan kuvvet arttığında fren iç hat basıncının da arttığı görülmüştür. Buna bağlı olarak kaliperin balatalara uyguladığı kuvvet artmış ve tam frenleme mesafesi azalmıştır.
- Kadın sürücülerin erkek sürücülere kıyasla fren pedalına uyguladıkları kuvvetlerin daha az olduğu gözlemlenmiştir.
- Sürücülerin yaş, boy ve kiloları ile fren pedalına uyguladıkları kuvvet arasında belirgin bir ilişki görülmemiştir.
- Debriyajsız deneylerde maksimum-minimum fren mesafesine sahip sürücüler arasında 2.80 metre fark görülmüştür.
- Debriyajlı deneylerde maksimum-minimum fren mesafesine sahip sürücüler arasında 3.79 metre fark görülmüştür.
- FSTC'nin sabit ataletinin toplam 160 kg kütledeki tambur ve tekerlekler

vasıtasıyla sağlanmasından dolayı deney sonuçlarında elde edilen tam frenleme süreleri gerçek bir taşıta göre oldukça düşüktür. Yaklaşık 1000-1200 kg kütlede olan gerçek bir taşıtın ataletinin FSTC'nin ataletinden oldukça fazla olduğu açıktır. Buradan yola çıkarak FSTC'den elde edilen fren mesafesi verilerinin bir korelasyon ile gerçek taşıta benzetilmesi gerektiği görülmüştür. Dolayısıyla bir düzeltme algoritması uygulanarak FSTC'nin yavaşlama ivmesi gerçek taşıt yavaşlama ivmesine benzetilmiştir. Düzeltilmiş yavaşlama ivmesi ve düzeltilmiş frenleme süresi kullanılarak düzeltilmiş tam frenleme mesafesi elde edilmiştir.

- Bütün test sonuçları beraber değerlendirildiğinde 60 km/s taşıt hızı için FSTC'ye uygulanan düzeltme algoritmasının bağlı hatasının %3.46 olduğu görülmüştür. FSTC'den elde edilen verilerin korelasyonu sağlandıktan sonra elde edilen düzeltilmiş verilerin literatürle benzerlik gösterdiği görülmüştür. Dolayısıyla uygulanan düzeltme algoritmasının FSTC ile yapılan çalışmalardaki durma mesafesi verilerinin gerçek taşıtlara benzetiminde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi 18.KARIYER.58 numaralı BAP projesi tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

- Albatlan S. A., 2012. Automotive brake pipes characteristics and their effects on brake performance. *Ain Shams Engineering Journal*, **3**, 279-287.
- Bayrakçeken H., Aysal F. E., Mutlu İ., 2016. Fren Süspansiyon Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **16**, 454-460.
- Bayrakçeken H., Düzgün M., 2005. Taşıtlarda Fren Verimi ve Frenleme Mesafesi Analizi. *Politeknik Dergisi*, **8 (2)**, 153-160

- Çavdar A., Bayrakçeken H., 2006. Otomobillerde Kullanılan Frenleme Yardımcı Sistemlerinin İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 50-59.
- Deepa A. , Yashwant D. S., Mukesh V., Pranshu K., 2018. Analysis on Multi Linkage Brake System with Variable Pedal Ratio. *Materials Today: Proceedings*, **1**, 13606-13611.
- Düzgün M., Altıparmak D., Bayrakçeken H., 2005. Otomobillerde Fren (Durma) Mesafesinin Deneysel Olarak Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **18**, 153-165.
- Fambro D. B., Rodger K., Dale P., Fitzpatrick K., 2000. Driver Braking Performance in Stopping Sight Distance Situations. *Transportation Research Record*, **1701**, 9-16.
- Göktan A. G., Güney A., Ereke M., 1995. Taşıt Frenleri, İstanbul: İTÜ Makina Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı.
- Pawar N. M., Khanuja R. K., Choudhary P., Velaga N. R., 2020. Modelling braking behavior and accident probability of drivers under increasing time pressure conditions. *Accident Analysis & Prevention*, **136**, 105401.
- Ryzhikov V. A., Batyshchev D. Y., 2017. Differential Braking Device. *Procedia Engineering*, **206**, 1570-1576.
- Sun R., Zhuang X., Wu C., Zhao G., Zhang K., 2015. The estimation of vehicle speed and stopping distance by pedestrians crossing streets in a naturalistic traffic environment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **30**, 97-106.
- Surblys V., Sokolockij E., 2015. Research of the Vehicle Brake Testing Efficiency. *9th International Scientific Conference Transbaltica*, Lithuania.
- Yadav A. K., Velaga N. R., 2019. Effect of alcohol use on accelerating and braking behaviors of drivers. *Traffic Injury Prevention*, **20**, 353-358.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 047101 (741-752)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 047101 (741-752)

DOI: 10.35414/ akufemubid.664701

Araştırma Makalesi / Research Article

Rüzgâr Enerji Santrali Projelerinde Topografik Yersel Ölçme ve Gözlemlerden Kaynaklanan Risklerinin İncelenmesi

Eray CAN¹, Hikmet ERBIYIK²¹Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Yalova / Türkiye.²Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yalova / Türkiye.Sorumlu yazar ¹e-posta: can.eray@hotmail.comORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8192-1703>²e-posta: hikmeterbiyik53@gmail.comORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8010-0199>

Geliş Tarihi: 25.12.2019

Kabul Tarihi: 20.08.2020

Öz

Anahtar kelimeler

Rüzgâr enerji santralleri; Mühendislik ölçmeleri; Hata Türü etkileri analizi (HTEA); Pareto analizi; Risk belirleme

Günümüzde ülkelerin toplumsal refahlarının artması ve diğer ülkelerle ileri düzeyde rekabet edebilmelerinde, enerjinin payı oldukça büyüktür. Özellikle son yıllarda, toplumdaki nüfus artışları ve bu nüfus artışları sonucu; kentleşmenin, sanayileşmenin ve savunmanın öneminin artması, enerji ihtiyacını her geçen gün daha da artırmaktadır. Yine insanoğlu çağımızda; fosil yakıtların çevreye vermiş oldukları zararlarının bulunması, bu yakıt türünün hızla tükenmeye başlaması ve bu yakıt türlerinin maliyetlerinin yüksek olması vb. sebeplerle alternatif enerji kaynaklarına yönelmektedir. Özellikle enerji türlerinin arasında büyük bir paya sahip olan sürdürülebilir elektrik enerjisi üretiminde, fosil yakıtlar yerine, rüzgâr enerjisinden faydalanmak, alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Rüzgâr enerjisi kullanarak elektrik üreten santral projelerinin tasarımında uygulanmasında ve işletilmesinde, projenin tasarlandığı arazinin, projeyle uyumu da önemli bir unsur olmaktadır. Bu uyumun gerçekleşebilmesi için de arazide yapılan mühendislik ölçmeleri son derece önemli olmaktadır. Çalışmada, bu enerji santrallerinin tesis edilebilmesi için yapılan mühendislik ölçmeleri sırasında oluşan risk ve hata faktörleri, Hata türü etkileri analizi adı verilen (HTEA) sistematigi içinde araştırılmıştır. Ayrıca belirlenen bu risklerin önem sırası da, Pareto analizi sistematiginde belirtilmiştir. Yine, karşılaşılabilecek olan bu risklere karşı alınabilecek önlemler, uzman görüşleri dikkate alınarak incelenmiştir.

Research of the Risks that are Originated from Topographic Terrestrial Observations in Wind Energy Power Plant Projects

Abstract

In our days, in order to increase the social prosperity of the nations and gaining competitive advantage against the other nations, the share of the energy is prominent. Nowadays the increase of populations in the nations and as a result of this situation; the increase of urbanization, industrialization and defence needs, are increasing the energy demand. Again, the human is being forwarded to the alternative energy sources, due to increase of fossil fuel damages into environment, depletion of fossil fuels in a speedy manner and increase of the cost of the fossil fuels, etc. Especially, in the production of sustainable electrical energy, that has an important share among the other energy types; preferring wind energy instead of fossil fuels is consisting of the leading alternative energy sources. In design, implementation and operation of the electrical power plants projects that utilize wind energy, the conformity of the concerned field with the project becoming an important factor. In order to realize this conformity, the engineering measurements that are made in the relevant field are also becoming important. In this study, the failure factors that occurred during the engineering measurements for the establishment of these power plants were examined in the FMEA systematic called Failure Mode Effects Analysis. However, the order of importance of these identified risks is indicated in the Pareto analysis. Beside the preventions that can be taken against these risks are examined by taking into consideration the expert opinions.

Keywords

Wind energy power plants; Engineering measurements; Failure mode effect analysis (FMEA); Pareto analysis; Risk detection

1. Giriş

Son yıllarda özellikle, teknolojik gelişmeler ve dünyadaki metropollerin de büyümesiyle birlikte, fosil yakıtların tüketiminde büyük oranda artışlar olmaktadır. Kullanılan bu fosil yakıtların; çevreye zarar vermesi, yeraltı ve yerüstü madencilik faaliyetleriyle yüksek maliyet gerektiren çalışmalar sonucu üretilmiş olmaları, artan nüfusla birlikte hızla tükeniyor olması insanoğlunu alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Bu arayış sonucunda da pahalı, çevreye zararlı ve tükenmeye başlayan fosil yakıtlarının yerine daha uygun maliyetli, sürdürülebilir ve çevreye uyum içindeki rüzgâr, su, jeotermal ve güneş ışığı gibi alternatif enerji kaynaklarına odaklanılmıştır. Özellikle çağımızda kentlerdeki yaşam kalitesinin de artmasıyla elektrik enerjisine olan talep daha da artmaktadır. Artan bu enerji türünün karşılanmasında ve üretilmesinde, tükenmeye başlayan fosil yakıtlar artık yerini alternatif ekonomik, yenilenebilir ve çevresel bir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisine bırakmaktadır. (Şen 1999; Tarawneh and Şahin 2003; Ramachandra and Shruthi, 2005; Cellura et al. 2008; Ajayi 2009; Beccali et al. 2010; Amoo, 2012; Miryousefi et al. 2016; Marugána et al. 2018). Rüzgâr enerjisi kullanarak elektrik üreten santral projelerinin (Rüzgâr enerjisi santralleri) tercih edilmesiyle ilgili olarak;

- Yatırım maliyetleri açısından incelendiğinde diğer alternatif enerji kaynaklarına nazaran düşük maliyetlere sahip olması
- Projelendirme ve tesis edilme sürelerinin kısa olması
- Elektrik üretimi için tesis edilen rüzgâr enerji santrallerinin işletme kolaylıklarının bulunması,
- Rüzgâr enerjisi santrallerinin bakım-onarım faaliyetleri incelendiğinde maliyetlerinin düşük olması
- Dünyadaki ülkelerin bu santralleri kurmasıyla kaynak olarak dışa bağımlı olmamaları
- Rüzgâr enerjisinin doğal tükenmeyen ve gelecekte de temin edilebilecek bir enerji olması,

- Rüzgâr enerjisinin atmosferik ısınmaya yol açmayan, CO₂ emisyonu olmayan, insan sağlığına zarar vermeyip, çevreye uyumlu olması,
- Elektrik enerjisi üretmek üzere tasarlanan rüzgâr enerji santrallerinin teknolojik gelişmelere açık olması

gibi sebepler sayılabilmektedir. Böylesine avantajları oldukça fazla sayılabilecek rüzgâr enerji santralleri projelerinin, tasarımı tesisi ve işletilmesi sırasında, tesis edileceği arazinin konumu, geometrisi, sayısal yüksek modelleri, eğim koşulları, jeolojik ve jeofiziksel koşulları da önemli olmaktadır. Ayrıca rüzgâr enerji santrali projesinin, arazinin yükseklik modeliyle uyumu da rüzgâr enerjisi ve hızından maksimum seviyede yararlanılmasında üzerinde durulması gereken önemli bir konu olmaktadır (Şen 1999). Arazinin sayılan bu özelliklerinin doğru ve güncel bir şekilde yansıtılması ve rüzgâr enerjisi santral projelerine altlık olarak hizmet verecek harita plan ve kesitlerin de hassas olarak üretilmesi için de arazide yapılacak olan hassas mühendislik ölçüm çalışmalarının önemini daha da arttırmaktadır. Rüzgar enerji santralleri projelerine altlık olacak haritalar için yapılacak olan yatay ve düşey konum ölçümlerinde, arazide çok hassas olarak tesis edilmiş, optimizasyon ve istatistiki testleri yapılmış ve koordinatları hassas olarak bilinen yer kontrol ölçme ağına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ağda yapılan yatay konum belirleme ile hesaplama için mm hassasiyetindeki Global Positioning Systems (GPS) ölçmeleri ve düşey konum belirleme ile hesaplamaları için ise yine mm hassasiyetindeki dijital nivo kullanılarak geometrik nivelman ölçümleri, arazinin topografik ve eğim durumunu yansıtan harita, plan ve kesitlerin üretilmesinde önemli roller oynamaktadırlar. Özellikle günümüzde kullanılan Lidar uygulamaları, arazinin güncel durumunun hassas olarak yansıtılması için kullanılan yöntemler arasında yerini almıştır. (Shu et al. 2016; Li and Yu 2017; Fang et al. 2018). Rüzgar enerji santralleri aracılığıyla elektrik enerjisi üretimini amaçlayan projelerde, karşılaşılan risklerin belirlenmesi ve gerekli önlemlerin

alınmasına yönelik, güncel bir çok risk analizi ve risk yönetimi çalışmaları literatürde yapıldığı görülmektedir. Konu ile ilgili olarak literatürde çalışılan risk yönetimi ve risk analizi yöntemleri arasında; Hata Ağacı Analizleri (Kang et al. 2019; Brouwer et al. 2018), Ağırlıklı Toplam Yöntemi (WSM) (Kucukali, 2016), SWOT (Güçlü, zayıf, fırsat ve tehdit analizleri and McKinsey Matris Analizleri (Rolik 2017), AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi analizi), (Xinyao et al. 2017), Correlation-FMEA (Korelasyon Hata Türü Etkileri Analizi) (Kang et al. 2017), Hata Türü Etkileri Analizi ve diğer risk metotları (Leimeister and Kolios 2018; Yssaad and Abene 2015) gibi risk analizleri sayılabilmektedir. Elektrik enerjisinin üretilebilmesi için, rüzgar enerji santrallerinin kurulacağı topografyanın güncel ile hassas durumunun belirlenmesi ve bununla birlikte bu topografyaya ait sayısal yükseklik modelinin (Digital Elevation Model) (DEM) oluşturulması ve analiz edilmesi oldukça önemli bir konu olmaktadır. Bu konu ile ilgili literatürde güncel olarak önemli çalışmalar yapılmıştır. (Argin et al. 2019; Han et al. 2018; Kim and Lim 2017; Gualtieri 2019; Bosch et. al 2018; Liua et al. 2019; Nedjari et al. 2017; Lun et al. 2007; Ferragut 2010; Beccali et al. 2010). Yine Rüzgar enerji santralleri aracılığıyla elektrik enerjisi üretimini amaçlayan projelerde topografyanın güncel olarak haritasının yapılmasında ve topografyaya ait sağlıklı, hassas ve proje ile uyumlu bir sayısal yükseklik modelinin (SYM) oluşturulmasında arazide gerçekleştirilen mühendislik ölçmelerinin payı da oldukça büyük olmaktadır. (Fang at al. 2018; Shu et al. 2016; Li and Yu 2017; Finardi et al. 1998). HTEA ve Pareto yöntemleri, risk belirleme yöntemleri arasında yer alan ve risklerin önceden belirlenip önlemlerinin alınması ve öncelik sırasına göre sıralanmasına yardımcı olan yöntemler olup yine literatürde oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Bununla birlikte rüzgar enerjisine yönelik çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. (Shafiee and Dinmohammadi 2014; Tazi et al. 2017). Bu çalışmada ise elektrik enerjisi üretmek için kurulan rüzgâr enerji santralleri projelerinde;

- Risk analizi ve risk yönetimi

- Topografya ile uyum,
- Arazi ölçmeleri
- HTEA ile Pareto risk belirleme yöntemleri

olarak sayılabilecek 4 faktör bir arada incelenmektedir. Böylelikle bu tür projelerin tasarımı ve yapılması sırasında, topografya ile uyumun sağlıklı bir şekilde sağlanması için, gerçekleştirilen mühendislik ölçmelerin doğru yapılması gerektiği vurgulanmış ve burada oluşan riskler ve önlemler HTEA ve Pareto sistematğinde araştırılmıştır. Bunun sonucu olarak da bu 4 faktörün beraber incelenmesi ve araştırılması ile birlikte literatüre yeni bir katkı yapılmaya çalışılmıştır.

2. Metot: Hata Türü Etkileri Analizi (HTEA) ve Pareto Sistemi

Literatürde de yaygın olarak kullanılan bu yöntem, gerek projelerde gerekse de kullanılan sistemlerde başarısızlıkların ve risklerin zarar vermeden önce keşfedilmesi ve saptanan bu hataların önüne geçilmesi ve önlemlerin bir an önce alınması için kullanılan bir sistematik metot olarak karşımıza çıkmaktadır. (Liu et al. 2013; Akın 1998). Bahsetmiş olduğumuz bu yöntem, proje, sistem ve planlamalarda, risk ve hataları belirlerken ilgili yönetmelik, tüzük ve düzenlemeleri de dikkate almaktadır. Bunun sonucu olarak da bu yöntem diğer risk belirleme sistemlerinden belirgin bir şekilde de ayrılmaktadır. Bu analiz oldukça yaygın bir uygulama alanında kullanılmakla birlikte hataların belirlenmesi için oldukça sistematik ve etkili bir metot olmaktadır. (Liu et al. 2013; Chin et al. 2009; Wang et al. 2009). Bu metodun, projenin ya da bir planlamanın ilk aşamasında ya da tasarımında uygulanması buralarda yapılacak olan önlemlerin alınmasında daha az maliyetlerin oluşmasına sebep olacaktır. Uygulanan bu metodun sağladığı avantajlar;

- Uygulanacak olan projenin ya da planlamanın kalitesini ve sağlamak
- Projede uygulanacak olan iş kalemlerinin öncelik sıralamasını gerçekleştirmek

- Proje ya da planlanan faaliyetler için bütün uygulama boyunca riskleri belirlemek ve bu risklerin etkilerini belirlemek
- Projedeki hataların ve yanlışlıkların önüne geçilmesini sağlamak ve bunların belirlenmesi için sistematığın kurulmasına yardımcı olmak
- Risklere karşı belirlenebilecek önlemlerin alınmasını sağlamak
- Hataların izlenmesini ve dokümantasyonlarının yapılmasını sağlamak

vb. gibi sıralanabilmektedir. Bu risk belirleme sistematığında her bir belirlenen risk ve sistem için hangi ekibin görev alacağına belirlenmesi de önemli olmaktadır. Belirlenen bu ekibin bilgi ve tecrübesi ışığında RÖS yani risk öncelik sayısı hesaplanmaktadır. Projelerde ya da sistemlerde kullanılan bu yöntemin (HTEA) uygulanması sırasında risklerin belirlenmesi için belirli bir formül ve sistematik izlenmektedir. Sonuç olarak projelerde risklerin ve yanlışlıkların önceliklerini saptamak için üç unsur dikkate alınmaktadır. Bunlar;

- Hatanın oluşma olasılığı,
- Hatanın şiddeti,
- Hatanın saptanabilirliği

üzerinden olmaktadır. (Akin 1998; Wang et al. 2009; Xiao et al. 2011; Su et al. 2012). Bu etkenlerden hatanın oluşma olasılığı; riskin sıklığını; (1-10 puan arası puan sistemi kullanılmaktadır.) göstermektedir.(Çizelge 1).

Çizelge 1. Riskin Oluşma Olasılığı (O) Derecesi (Akin 1998; Xiao et al. 2011; Su et al. 2012)

Riskin Meydana Gelme Sıklığı	Hata Olasılık	Kademe
Çok Yüksek. Kaçınılmaz risk	½ 'den fazla	On
	1/3	Dokuz
Yüksek. Tekrarlan risk	1/8	Sekiz
	1/20	Yedi
Orta. Bazen Olan risk	1/80	Altı
	1/400	Beş
Düşük. Kısmen Olan risk	1/2000	Dört
	1/15000	Üç
Pek az. Olası Görülmeyen risk	1/150000	İki
	1/150000 ' den düşük	Bir

Hatanın şiddeti; zararı oluşturan durumun oranını (1-10 arasında yapılan puanlama sistemi kullanılır) (Çizelge 2). Riskin saptanabilirliği ise zararı oluşturan durumun tespit edilmesindeki güçlük kademesini belirtmektedir. (1-10 arasında yapılan puanlama sistemi kullanılır) (Çizelge 3).

Çizelge 2. Riskin Şiddet Bileşeninin Derecelendirilmesi (A) (Akin 1998)

Etkilenme Türü	Şiddetin Yansıması	Kademesi
Aniden Gelen Yüksek tehlike	Felakete neden olan ve aniden gelen hata türü	On
Aniden Gelen Tehlike	Yüksek zarar verebilecek aniden gelen hata türü	Dokuz
Çok Yüksek	Projenin çok fazla ve yüksek derecede zarar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip hata türü	Sekiz
Yüksek	Ekipmanın çok fazla bir şekilde zarar, hasar görmesine sebep olan hata türü	Yedi
Orta	Sistemin ya da projenin çalışmasını, uygulanmasını etkileyen hata türü	Altı
Düşük	Projede küçük etkiler oluşmasını sağlayan hata türü	Beş
Çok Düşük	Sistemde, projelerde ya da planlamalarda hafif hasarlara neden olan hata	Dört
Küçük	Proje ya da sistem uygulamasını yavaşlatan hata türü	Üç
Çok Küçük	Proje uygulamasında kargaşaya neden olabilecek hata türü	İki
Yok	Uygulamada etkisiz kalan hata türü	Bir

Burada sayılan etkenlerin değerlerini saptamada birden çok metod bulunmaktadır. Literatürde genellikle bu etkenlerin saptanmasında ve gösterilmesinde risk gösterge tabloları kullanılmaktadır. Bu anlatılan üç etken (Olasılık, şiddet ve saptanabilirlik); projede ya da sistemde belirlenen her bir risk için hesaplanacak olan Risk öncelik (RÖS) sayısının hesaplanmasında kullanılmaktadır. (Liu et al. 2013; Su et al. 2012).

Çizelge 3. Risk Öncelik Sayısının Belirlenmesinde Saptanabilirlik (Keşfedilebilirlik) (S) kademeleri (Akin 1998)

Keşfedilebilirlik	Keşfedilebilirliğin Olasılığı	Kademe
Fark Edilemeyen Hata	Riskin nedeninin ve takip eden hatanın belirlenebilmesi mümkün değil	On
Çok Az fark edilen hata	Riskin nedeninin belirlenebilmesi mümkün değil çok uzak	Dokuz
Az fark edilebilen hata	Riskin belirlenme nedeni uzak	Sekiz
Çok Düşük fark edilebilen hata	Riskin nedeninin belirlenebilmesi çok düşük	Yedi
Düşük fark edilebilen hata	Riskin nedeninin belirlenebilmesi düşük	Altı
Orta fark edilebilen hata	Potansiyel hatanın nedeninin belirlenebilmesi orta	Beş
Yüksek Ortalama fark edilebilen hata	Potansiyel hatanın nedeninin belirlenebilmesi yüksek ortalama	Dört
Yüksek fark edilebilen hata	Potansiyel hatanın nedeninin belirlenebilmesi yüksek	Üç
Çok Yüksek fark edilebilen hata	Potansiyel hatanın nedeninin belirlenebilmesi çok yüksek	İki
Hemen hemen kesin fark edilebilen hata	Potansiyel hatanın nedeninin belirlenebilmesi hemen hemen kesin	Bir

Bu hata ve risk analizinde; büyük risk öncelik sayısı olan risk ve hatadan başlamak suretiyle bu risk ve hataların uygun ekip ve yönetmeliklerle en aza indirilmesi ve önlemlerin alınması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte bu risklerin gelecek zamanlarda da proje için tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Bu yöntem için risk öncelik sayıları; Hatanın oluşma Olasılığı (O), hatanın şiddeti ya da Ağırlığı (A) ve hatanın keşfedilebilirliği ya da saptanması (S) değerlerinin çarpılması ile bulunmaktadır (Akın 1998; Wang et al. 2009; Xiao et al. 2011; Su et al. 2012). Çizelge 4 de RÖS özet çizelgesi verilmektedir.

$$RÖS=O(\text{Hatanın oluşma olasılığı}) * A(\text{Hatanın şiddeti ya da ağırlığı}) * S(\text{Hatanın keşfedilebilirliği ya da saptanması}) \quad (1)$$

Bu risk belirleme metodunda kullanılan Risk öncelik sayısı, projelerdeki ve uygulamalardaki karşılaşılabilecek olan hata ve risklerin hangisinin öncelikle ve acil olarak ele alınması ve önemle

üzerinde durulması gerektiğini belirlemede yardımcı bir faktör olmaktadır.

Çizelge 4. Risk Öncelik Sayısı (RÖS) Özet Çizelgesi (Akın 1998)

Risk Öncelik Sayısı (RÖS)	Önlem Vaziyeti
RÖS<40	Hafif Risk (Önleme gerek yok)
40≤ RÖS ≤100	Orta risk (Önlem alınabilir)
RÖS>100	yüksek risk (Önlem alınmalıdır)

Ayrıca risk öncelik sayısı projeyi hatalardan ve risklerden arındırmak isteyen uzman ve araştırmacılara da önemli bir yol haritası çizmektedir. Çalışmada kullanılan bir diğer analiz metodu olan Pareto ise belirlenen risk ve hataların belli bir eşik değerine bağlı olarak risklerin öncelik durumlarını, yüzdelik oranlarını, önem derece ve sıralarını ortaya koymaktadır (Özcan 2001). Literatürde genelde (%70-%80) eşik oranları kullanılmakla birlikte hangi risklere daha fazla önem vermemiz ve hemen acil bir şekilde önlem almamız gerektiğini ortaya koymaktadır.

3. Bulgular: Rüzgâr Enerji Santrali Projelerinde Yapılan Topografik Yersel Ölçme ve Gözlemlerden Kaynaklanan Hata ve Risklerin HTEA ve Pareto Sistematiğinde İncelenmesi

Rüzgâr enerji santralleri projelerinde, projenin oturmuş olduğu arazinin, güncel ve hassas olarak harita, plan ve kesitlerde yansıtılması gerekmektedir. Bununla birlikte, projenin bulunduğu arazinin sayısal yükseklik modelinin oluşturulması ve bu arazi modelinin bilgisayar ortamında 3D (3 boyutlu) modellerinin yapılması da gerekli olmaktadır. Bununla birlikte, rüzgâr enerji projelerinin tasarımında, yine rüzgârın proje bölgesindeki esme yönüne ve projenin bulunduğu arazinin eğim yönüne göre simülasyonların yapılması da gerekli olmaktadır. Bu sayısal yükseklik modelinin Z (H yükseklik) koordinatlarına göre oluşturulması ve hatta X,Y,Z (Konum) koordinatlarına bağlı olarak da güncel harita plan ve kesitlerin araziye yönelik çıkartılması için de sahada yapılacak olan mühendislik ya da topografik ölçümlerin hassas ve hatasız yapılması daha da önem arz etmektedir. Arazide yapılan bu ölçme

konularında bazı hata ve risklerle karşılaşabilmektedir. Çalışmada ilk olarak, konu ile ilgili uzman kişilerin de (Harita, inşaat, jeoloji, endüstri mühendisleri vb.) görüşleri gözetilerek, rüzgâr enerji santrali projelerindeki ölçme işlerine konu hangi hata ve risklerle karşılaştığı araştırılmakla birlikte 10 adet risk tespit edilmiştir. Buna göre belirlenen bu 10 risk HTEA sistematğinde araştırılmıştır. Bu riskler arasında;

- Rüzgâr enerji santrali projesinin arazide yerleşeceği topografik bölgenin, yükseklik modelinde ve eğim bilgilerinde yapılan hata ve riskler, (Proses No:E1)
- Projede kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının yapılmamasından kaynaklanan ölçüm hata ve riskleri, (Proses No:E2)
- Rüzgâr Enerjisi Proje sahasındaki yatay eksene ait ölçmeler için (X ve Y koordinatlarının belirlenmesi) tasarımı yapılan ağıdaki hata ve riskler, (Proses No:E3)
- Rüzgâr enerji projelerinin tesis edileceği bölgede heyelan kontrol analiz ve ölçümlerinin yapılmamasından kaynaklanan risk ve hatalar, (Proses No:E4)
- Rüzgâr enerji projesinin uygulanacağı arazinin jeolojik ve jeofiziksel test ve araştırmaların eksikliğinden kaynaklanan risk ve hatalar, (Proses No:E5)
- Rüzgâr enerji projeleri ile ilgili olarak yapılan aplikasyonların projesine uygun bir şekilde gerçekleştirilmemesinden kaynaklanan hata ve riskler, (Proses No:E6)
- Proje için yapılan yükseklik ölçmeleri (Z koordinatı) ve bu yükseklik ölçmeleri sonucu oluşturulan arazi kesit çizimlerinde yapılan hata ve riskler, (Proses No:E7)
- Rüzgâr enerji projesinin uygulanacağı arazide mülkiyet, kadastro ve kamulaştırma ile ilgili ölçmelerdeki yapılan hata ve riskler, (Proses No:E8)
- Proje ekibindeki ölçmeleri yapan ekiplerle ilgili organizasyon yönetim planlama ve kontrol

konularında yapılan hata ve riskler, (Proses No:E9)

- Rüzgâr enerjisi projelerinin üretildiği koordinat sistemi ile arazi çalışma ve ölçümlerinin yapıldığı koordinat sistemi arasındaki uyumsuzluklardan doğan hataların deneyimsiz personeller tarafından yapılması sonucu oluşan hata ve riskler, (Proses No:E10)

gibi hata ve riskler tespit edilmiştir. Çalışmada ikinci olarak yine konu ile ilgili uzman kişilerin de görüşleri doğrultusunda bu risklerin oluşma olasılığı, riskin şiddeti ve riskin keşfedilebilirliği birlikte değerlendirilerek Risk Öncelik Sayıları (RÖS) belirlenmiş ve riskin çizelge 4 de belirtilen hangi risk grubuna girdiği saptanmıştır. Bu risk ve hataların giderilebilmesi için de hangi önlemlerin alınması gerektiği araştırılmış ve sonuçta RÖS katsayıları tekrar değerlendirilmiştir. Bu önlemler alınırken ayrıca hangi yönetmeliklerden de yararlanılması gerektiği HTEA tablosunda belirtilmiştir. Önlemler alındıktan sonra bu risk ve hataların, risk grupları içinde hafif risk grubuna girdiği tespit edilmiştir (Çizelge 5). Çalışmada belirlenen bu risk ve hata gruplarının öncelik sıralarını belirlemek amacıyla 2 defa Pareto Analiz sistematığı kullanılmıştır. Bu sistematığe göre her iki analiz türünde eşik değer olarak yaklaşık %80 oranı seçilmiştir. İlk Pareto analizinde, HTEA tablosundaki belirlenen bütün risklerin, bu eşik değerine ve RÖS sayılarının kümülatif toplamına göre değerlendirmesi yapılmış buna göre rüzgar enerji santralleri projelerinde gerçekleştirilen ve topografik ya da mühendislik ölçmeleri sırasında oluşan E1, E5, E3, E7, E4, E6, E8 numaralı risk ve hataların ön plana çıktığı görülmüştür (Çizelge 6). İkinci Pareto analizinde ise yüksek risk ve hata oranına sahip olan risk ve hatalar, kendi içinde yaklaşık %80 eşik değerine göre tekrar bir değerlendirmeye alınmış olup sonuçlar çizelge 7 de gösterilmektedir. Buna inceleme bulgusuna göre ise E1, E5, E3, E7, E4 numaralı risklerin en dikkat edilmesi gereken riskler olduğu anlaşılmaktadır. Uygulanan ilk Pareto analizi ve ikinci Pareto analizi ile ilgili grafiksel gösterimler Şekil 1 ve Şekil 2 de gösterilmektedir.

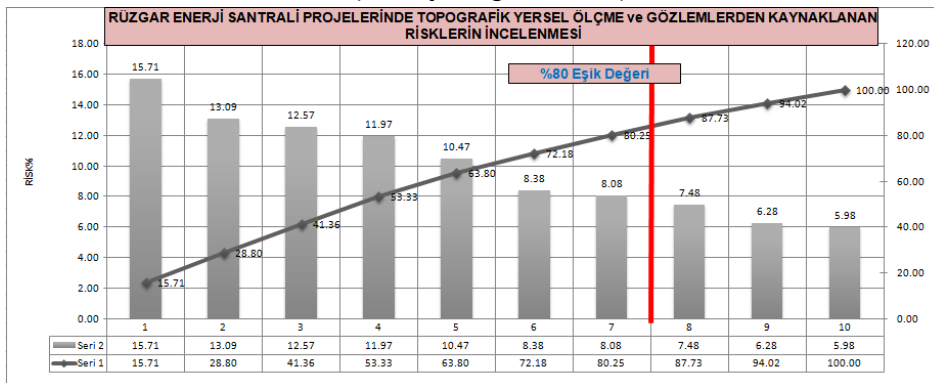
Çizelge 5. Rüzgâr Enerji Santralleri Projelerinde Gerçekleştirilen Topografik ya da Mühendislik Ölçmeleri Sırasında Oluşan Risklerin HTEA Sistematiğinde İncelenmesi

RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ PROJELERİNDE TOPOGRAFIK YERSEL ÖLÇME ve GÖZLEMLERDEN KAYNAKLANAN RİSKLERİN İNCELENMESİ										HTEA FORMU				
RISK = OLASILIK * ŞİDDET * TESPİT EDİLEBİLİRLİK														
Proses Adımı	OLASILIK		ŞİDDET		RISK DEĞERLENDİRMESİ			KONTROL ÖNLEMİ		RISK DEĞERLENDİRMESİ				
	1-2 Pek az	3-4 Düşük	1-2 Çok hafif	3-4 Hafif	Olacık	Şiddet	Tespit Edilebilirlik	R.O.S	Önem	Sorumluluk	Olacık	Şiddet	Tespit Edilebilirlik	R.O.S
1-2 Pek az 3-4 Düşük 5-6 Orta 7-8 Yüksek 9-10 Çok yüksek		1-2 Çok hafif 3-4 Hafif 5-6 Orta 7-8 Ciddi 9-10 Çok ciddi		RISK DEĞERLENDİRMESİ			KONTROL ÖNLEMİ		RISK DEĞERLENDİRMESİ					
HATANIN POTANSİYEL NEDENLERİ		HATANIN POTANSİYEL NEDENLERİ		RISK DEĞERLENDİRMESİ			KONTROL ÖNLEMİ		RISK DEĞERLENDİRMESİ					
Hata		Limit		R.O.S			Önem		R.O.S					
Hata		Limit		R.O.S			Önem		R.O.S					
E1	Rüzgâr enerji santrali projesinin arazide yerleşeceği topografik bölgenin, yükseklik modelinde ve eğitim bilgilerinde yapılan hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri, Rüzgar Enerjisi ile ilgili Yönetmelik ve Düzenlemeler	6	7	5	210	YÜKSEK RISK	Rüzgar enerjisi projesine ait arazi, proje başlamadan önce bölgede yapılan hassas ölçüm çalışmaları ile sağlıklı bir şekilde modellenmeli, sayısal yükseklik ve eğim modelleri bilgisayar ortamında enerji proje bilgileri ile birlikte değerlendirilerek simülasyon çalışmaları yapılmalı ve bu simülasyonlar sonrasında yine hata ve riskler görülmüyorsa, arazi modeline ait hassas ölçüm çalışmalarına arazide devam edilmelidir.	Harita Mühendisleri, Enerji Sistemleri Mühendisleri, Risk analiz ve Kontrol Mühendisleri, Bilgisayar Mühendisleri	3	3	3	27	DÜŞÜK RISK
E2	Projede kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının yapılmasından kaynaklanan ölçüm hata ve riskleri	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	4	7	3	84	ORTA RISK	Rüzgar enerjisi ile ilgili ölçmelerde kullanılan ölçme donanımlarının, akredite edilmiş laboratuvarlar tarafından, kalibrasiyonla titizlikle gerçekleştirilmelidir. Tüm ölçme donanımları ve ekipmanları için, yıllık kalibrasyon planları hazırlanır ve yıl içinde bu plandaki kalibrasyon tarihlerine uyulmalıdır.	Harita Mühendisleri	2	3	2	12	DÜŞÜK RISK
E3	Rüzgar Enerjisi Proje sahasındaki yatay eksene ait ölçmeler için (X ve Y koordinatlarının belirlenmesi) tasarımı yapılan ajdaki hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	5	8	4	168	YÜKSEK RISK	Proje için tasarımı yapılan ölçme ajda jeodezik ağ optimizasyonu test ve çalışmaları yapılarak, belirlenen yatay koordinatların doğruluğu kontrol edilmelidir.	Harita Mühendisleri	4	3	3	36	DÜŞÜK RISK
E4	Rüzgar enerji projelerinin tesis edileceği bölgede heyelan kontrol analiz ve ölçümlerinin yapılmasından kaynaklanan risk ve hatalar	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	5	7	4	140	YÜKSEK RISK	Bölgede tesis edilmis jeodezik ağı bağı olarak periyodik bir şekilde, heyelan ölçümleri yapılmalı ve heyelan parametreleri hesaplanarak gerekli önlemler zamanında alınmalıdır.	Harita Mühendisleri Jeolojik Mühendisleri Jeofizik Mühendisleri	3	4	3	36	DÜŞÜK RISK
E5	Rüzgar enerji projesinin uygulanacağı arazinin jeolojik ve jeofiziksel test ve araştırmaların eksikliğinden kaynaklanan risk ve hatalar	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri, Rüzgar Enerjisi Jeoloji ve Jeofizik ile ilgili Yönetmelik ve Düzenlemeler	5	7	5	175	YÜKSEK RISK	rüzgar enerji projelerinin uygulanacağı arazideki, yapılması gereken sondaj çalışmaları ile tüm jeolojik ve jeofiziksel test ve ölçümlerinin analizleri yapılmalı, sondaj noktalarının koordinatları ölçümlenmeli ve haritalandırılmalı yapılmı bu araştırmalar sonrasında arazinin yer iç yapısı ile ilgili kesitler çıkartılarak gerekli değerlendirmeler tam anlamıyla gerçekleştirilmelidir. Bölgenin hassas jeolojik ve fay haritaları çıkartılmalı ve proje bu analizlere göre tekrar değerlendirilmelidir.	Harita Mühendisleri, Enerji Sistemleri Mühendisleri, Risk analiz ve Kontrol Mühendisleri, Jeoloji Mühendisleri, Jeofizik mühendisleri	3	4	2	24	DÜŞÜK RISK
E6	Rüzgar enerji projeleri ile ilgili olarak yapılan uygulamaların projesine uygun bir şekilde gerçekleştirilmemesinden kaynaklanan hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	4	7	4	112	HIGH RISK	Rüzgar enerji projeleri ile ilgili olarak yapılan uygulamalarda uyumsuzluk tespit edilmiş ise projedeki uygulama koordinatları kontrol edilmeli ve hatta uygulama için kullanılan referans jeodezik ağ noktaları tekrar ölçümlenmeli ve koordinatları hesaplanmalıdır.	Harita Mühendisleri	3	3	3	27	DÜŞÜK RISK
E7	Proje için yapılan yükseklik ölçmeleri (Z koordinatı) ve bu yükseklik ölçmeleri sonucu oluşturulan arazi kesit çizimlerinde yapılan hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	6	7	4	160	YÜKSEK RISK	projede yapılan yükseklik ölçmelerinde hata tespit edilir ve bu hata, yönetmeliklerdeki hata sınırları içinde kalmıyorsa, proje bölgesindeki yükseklik ölçümleri tekrar edilmeli ve arazi kesit çizimleri tekrar edilmelidir.	Harita Mühendisleri	4	3	2	24	DÜŞÜK RISK
E8	Rüzgar enerji projesinin uygulanacağı arazide mülkiyet, kadastro ve kamulaştırma ile ilgili ölçmelerde yapılan hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri kamulaştırma ve kadastro ile ilgili yönetmelikler	6	6	3	108	YÜKSEK RISK	projenin uygulanacağı arazide kamulaştırma ve kadastro konularında yapılan ölçümler için referans noktaları olan yer kontrol noktaları tekrar kontrol edilmeli kamulaştırılacak alanlar tekrar hesaplanmalı kadastro ölçümleri tekrar arazide yenilenmelidir.	Harita Mühendisleri	2	3	2	12	DÜŞÜK RISK
E9	Proje ekibindeki ölçmeleri yapan ekiplerle ilgili organizasyon yönetim planlama ve kontrol konularında yapılan hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	4	5	4	80	ORTA RISK	Proje arazisinde bulunan ekibin ölçme işlerini zamanında ve projenin öngördüğü sürede bitirebilmesi için ölçme ekibinde: yönetim, planlama ve organizasyon konuları tekrar incelenmeli gerekirse risk analizleri yapılmalı ve zaman planlamaları ve kontroller tekrar tekrar kontrol edilmelidir.	Harita Mühendisleri Proje kontrol mühendisleri ve risk inceleme uzmanları	2	3	3	18	DÜŞÜK RISK
E10	Rüzgar enerjisi projelerinin ürettiği koordinat sistemi ile arazi çalışma ve ölçümlerinin yapıldığı koordinat sistemi arasındaki uyumsuzluklardan doğan hataların deneyimsiz personeller tarafından yapılması sonucu oluşan hata ve riskler	Büyük ölçekli Haritaların Yapım Yönetmelikleri	5	5	4	100	ORTA RISK	Arazide yapılan ölçümler ile rüzgar enerji projelerine ait koordinat sistemleri arasında dönüşümler yapılarak koordinat birliği sağlanmalı ve bu konularda çalışan personele teknik bilgiler verilmelidir.	Harita Mühendisleri	4	4	2	32	DÜŞÜK RISK

Çizelge 6. Rüzgâr Enerji Santralleri Projelerinde Gerçekleştirilen ve Topografik ya da Mühendislik Ölçmeleri Sırasında Oluşan Risklerin 1.Pareto Sistematiğinde İncelenmesi (%80 Eşik Değerine Göre)

RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ PROJELERİNDE TOPOGRAFIK YERSEL ÖLÇME ve GÖZLEMLERDEN KAYNAKLANAN RİSKLERİN İNCELENMESİ						
SIRA NO	HATA ŞEKLİ	PROSES NO	RÖS DEĞERİ	RİSK(%)	KÜMÜLATİF RİSK %	RİSK
1	Rüzgâr enerji santrali projesinin arazide yerleşeceği topografik bölgenin, yükseklik modelinde ve eğim bilgilerinde yapılan hata ve riskler	E1	210	15.71	15.71	YÜKSEK RİSK
2	Rüzgar enerji projesinin uygulanacağı arazinin jeolojik ve jeofiziksel test ve araştırmaların eksikliğinden kaynaklanan risk ve hatalar	E5	175	13.09	28.80	YÜKSEK RİSK
3	Rüzgar Enerjisi Proje sahasındaki yatay eksene ait ölçmeler için (X ve Y koordinatlarının belirlenmesi) tasarımı yapılan ağıdaki hata ve riskler	E3	168	12.57	41.36	YÜKSEK RİSK
4	Proje için yapılan yükseklik ölçmeleri (Z koordinatı) ve bu yükseklik ölçmeleri sonucu oluşturulan arazi kesit çizimlerinde yapılan hata ve riskler	E7	160	11.97	53.33	YÜKSEK RİSK
5	Rüzgar enerji projelerinin tesis edileceği bölgede heyelan kontrol analiz ve ölçümlerinin yapılmamasından kaynaklanan risk ve hatalar	E4	140	10.47	63.80	YÜKSEK RİSK
6	Rüzgar enerji projeleri ile ilgili olarak yapılan aplikasyonların projesine uygun bir şekilde gerçekleştirilmemesinden kaynaklanan hata ve riskler	E6	112	8.38	72.18	YÜKSEK RİSK
7	Rüzgar enerji projesinin uygulanacağı arazide mülkiyet, kadastro ve kamulaştırma ile ilgili ölçmelerdeki yapılan hata ve riskler	E8	108	8.08	80.25	YÜKSEK RİSK
8	Rüzgar enerjisi projelerinin üretildiği koordinat sistemi ile arazi çalışma ve ölçümlerinin yapıldığı koordinat sistemi arasındaki uyumsuzluklardan doğan hataların deneyimsiz personeller tarafından yapılması sonucu oluşan hata ve riskler	E10	100	7.48	87.73	ORTA RİSK
9	Projede kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının yapılmamasından kaynaklanan ölçüm hata ve riskleri	E2	84	6.28	94.02	ORTA RİSK
10	Proje ekibindeki ölçmeleri yapan ekiplerle ilgili organizasyon yönetim planlama ve kontrol konularında yapılan hata ve riskler	E9	80	5.98	100.00	ORTA RİSK

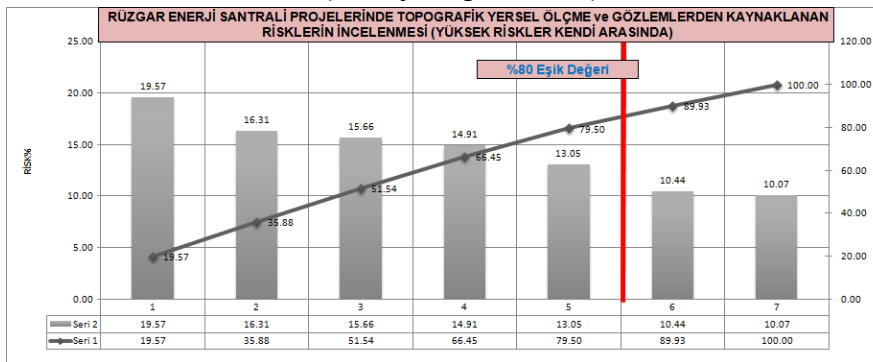
Şekil 1. Rüzgâr Enerji Santralleri Projelerinde Gerçekleştirilen ve Topografik ya da Mühendislik Ölçmelerinde Oluşan Risklerin 1. Pareto Analizindeki Grafik Gösterimi (%80 Eşik Değerine Göre)



Çizelge 7. Rüzgâr Enerji Santralleri Projelerinde Gerçekleştirilen ve Topografik ya da Mühendislik Ölçmelerinde Oluşan Risklerin 2.Pareto Sistematğinde İncelenmesi (%80 Eşik Değerine Göre)

RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ PROJELERİNDE TOPOGRAFIK YERSEL ÖLÇME ve GÖZLEMLERDEN KAYNAKLANAN RİSKLERİN İNCELENMESİ (YÜKSEK RİSKLERİN KENDİ ARASINDA)						
SIRA NO	HATA ŞEKLİ	PROSES NO	RÖS DEĞERİ	RİSK(%)	KÜMÜLATİF RİSK %	RİSK
1	Rüzgâr enerji santrali projesinin arazide yerleşeceği topografik bölgenin, yükseklik modelinde ve eğim bilgilerinde yapılan hata ve riskler	E1	210	19.57	19.57	YÜKSEK RİSK
2	Rüzgar enerji projesinin uygulanacağı arazinin jeolojik ve jeofiziksel test ve araştırmaların eksikliğinden kaynaklanan risk ve hatalar	E5	175	16.31	35.88	YÜKSEK RİSK
3	Rüzgar Enerjisi Proje sahasındaki yatay eksene ait ölçmeler için (X ve Y koordinatlarının belirlenmesi) tasarımı yapılan ağıdaki hata ve riskler	E3	168	15.66	51.54	YÜKSEK RİSK
4	Proje için yapılan yükseklik ölçmeleri (Z koordinatı) ve bu yükseklik ölçmeleri sonucu oluşturulan arazi kesit çizimlerinde yapılan hata ve riskler	E7	160	14.91	66.45	YÜKSEK RİSK
5	Rüzgar enerji projelerinin tesis edileceği bölgede heyelan kontrol analiz ve ölçümlerinin yapılmamasından kaynaklanan risk ve hatalar	E4	140	13.05	79.50	YÜKSEK RİSK
6	Rüzgar enerji projeleri ile ilgili olarak yapılan aplikasyonların projesine uygun bir şekilde gerçekleştirilmemesinden kaynaklanan hata ve riskler	E6	112	10.44	89.93	YÜKSEK RİSK
7	Rüzgar enerji projesinin uygulanacağı arazide mülkiyet,kadastro ve kamulaştırma ile ilgili ölçmelerdeki yapılan hata ve riskler	E8	108	10.07	100.00	YÜKSEK RİSK

Şekil 2. Rüzgâr Enerji Santralleri Projelerinde Gerçekleştirilen ve Topografik ya da Mühendislik Ölçmelerinde Oluşan Risklerin 2. Pareto Analizindeki Grafik Gösterimi (%80 Eşik Değerine Göre)



4. Sonuçlar

Rüzgâr enerji santrali projelerinde, arazinin konum ve geometrisinin belirlenip altlık olarak kullanılacak ve projeye temel teşkil edecek güncel plan ve haritaların oluşturulması gerekmektedir.

Bu haritaların oluşturulmasında sahada gerçekleştirilen mühendislik ölçmelerinin payı oldukça büyük olmaktadır. Yapılan ölçümler arazide tesis edilen hassas jeodezik ağı göre yapılmadığında çeşitli risk ve hatalar oluşabilmektedir. Çalışmada rüzgar enerji projeleri için böylesine önemli olan topografik

ölçme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi sırasında bazı hata ve riskler oluşuyor ise bu hata ve risklerin HTEA ve 1.Pareto sistematığında araştırılmıştır. Ayrıca oluşan riskler hakkında alınması gereken tedbirler ilgili uzman ekiplerin görüşü de dikkate alınarak belirtilmektedir. Bu sistematik inceleme ve araştırma sonrasında, yüksek risk grubunda yer alan bu hatalar, kendi içinde %80 eşik değerine bağlı olarak 2. Pareto analizine göre tekrar incelendiğinde ise ilk 5 risk ve hatanın, rüzgâr santrali projeleri ile ilgili ölçmelerinin yapılması sırasında daha fazla dikkate alınması ve önlemlerinin hemen alınması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Çalışmada, bu tür enerji santrali ile ilgili olan projelerde, yersel topografik ölçme gözlemleri yapan araştırmacı, uzman ve mühendisler bu gözlemler ve ölçmeler konusunda oluşabilmesi muhtemel hata ve risklerin neler olduğu gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, yine bu çalışmada hata türü etkileri analizi ile pareto analizinin konu ile ilgili yönetmelikler ve uzman görüşleri de dikkate alınarak, bu tür hataların oluşmadan önce önüne geçilmesi ve büyük maddi kayıpların bu tür projelerde önlenmesi açısından, etkin birer metot olduğu gösterilmek istenmiş ve araştırılmıştır.

6. Kaynaklar

- Ajayi, O.O.,2009. Assessment of utilization of wind energy resources in Nigeria. *Energy Policy*, **(37)** (2009), 750–753, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.020>
- Akın, B., 1998. ISO 9000 Uygulamasında ve İşletmelerde Hata Türü ve Etkileri Analizi. Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 182.
- Amoo, O.M., 2012. Evaluation of the wind energy potential of two south west sites in Nigeria. *Frontiers in Energy*, **6(3)**, 237-246, <https://doi.org/10.1007/s11708-012-0201-2>
- Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., Cali, U., 2019. Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multicriteria site selection.

Energy Strategy Reviews, **23** (2019), 33–46, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.005>

- Beccali, M., Cirrincione, G., Marvuglia, A., Serporta, C., 2010. Estimation of wind velocity over a complex terrain using the Generalized Mapping Regressor. *Applied Energy*, **(87)**(2010), 884–893, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.026>
- Bosch J, Staffell I, Hawkes, AD (2018) Temporally explicit and spatially resolved global offshore wind energy potentials. *Energy*, **163** (2018), 766-781, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.153>
- Brouwer, S.R., Al-Jibouri, S.H.S., Cárdenas, I.C., Halman, J.I.M. (2018). Towards analysing risks to public safety from wind turbines. *Reliability Engineering and System Safety*, **180** (2018), 77–87, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.010>
- Cellura, M., Cirrincione, G., Marvuglia, A., Miraoui, A., 2008. Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: A neural kriging application. *Renewable Energy*, **(33)**(2008), 1251–1266, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.08.013>
- Chin, K.S., Wang, Y.M., Poon Gary Ka, K., Yang, J.B., 2009. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. *Computers & Operations Research*, 36(2009):1768–1779, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.05.002>
- Finardi, S., Tinarelli, G., Faggian, P., Brusasca, G., 1998. Evaluation of different wind field modeling techniques for wind energy applications over complex topography. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **74-76** (1998), 283-294, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00025-7)
- Ferragut, L., Montenegro, R., Montero, G., Rodri'guez, E., Asensio, M.I., Escobar, J.M., 2010. Comparison between 2.5-D and 3-D realistic models for wind field adjustment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98** (2010), 548–558, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.04.004>
- Fang, J., Peringer, A., Stupariu, M.S., Patru-Stupariu, I., Buttler, A., Golay, F., Porté-Agel, F., 2018. Shifts in wind energy potential following land-use driven vegetation dynamics in complex terrain. *Science of*

- the Total Environment*, **639 (2018)**, 374–384, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.083>
- Gualtieri, G., 2019. A comprehensive review on wind resource extrapolation models applied in wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **102(2019)**, 215–233, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.015>
- Han, X., Liu, D., Xu, C., Shen, W.Z., 2018. Atmospheric stability and topography effects on wind turbine performance and wake properties in complex terrain. *Renewable Energy*, **126 (2018)**, 640-651, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.048>
- Kang, J., Sun, L., Sun, H., Wu, C., 2017. Risk assessment of floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA. *Ocean Engineering*, **129 (2017)**, 382–388, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.048>
- Kang, J., Sun, L., Guedes Soares, C., 2019. Fault Tree Analysis of floating offshore wind turbines. *Renewable Energy*, **133(2019)**, 1455-1467, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.097>
- Kim, Y.H., Lim, H.C., 2017. Effect of island topography and surface roughness on the estimation of annual energy production of offshore wind farms. *Renewable Energy*, **103 (2017)**, 106-114, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.020>
- Kucukali, S., 2016. Risk scorecard concept in wind energy projects: An integrated approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **56(2016)**, 975–987, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.017>
- Leimeister, M., Kolios, A., 2018. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **91 (2018)**, 1065–1076, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>
- Li, J., Yu, X(B), 2017. LiDAR technology for wind energy potential assessment: Demonstration and validation at a site around Lake Erie. *Energy Conversion and Management*, **144 (2017)**, 252–261, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.061>
- Liu, H.C., Liu, L., Liu, N., 2013. Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: A Literature Review. *Expert Systems with Applications*, **40(2013)**, 828-838, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Liua, F., Sun, F., Liu, W., Wang, T., Wang, H., Wang, X., Lim, W.H., 2019. On wind speed pattern and energy potential in China. *Applied Energy*, **236 (2019)**, 867–876, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.056>
- Lun, Y.F., Mochida, A., Yoshino, H., Murakami, S., 2007. Applicability of linear type revised k– e models to flow over topographic features. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **95(2007)**, 371–384, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.09.004>
- Marugána, A.P., Márquez, F.P.G., Perez, J.M.P., Ruiz-Hernández, D., 2018. A survey of artificial neural network in wind energy systems. *Applied Energy*, **228(2018)**, 1822–1836, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.084>
- Miryousefi Aval S.M., Ahadi, A., Hayati, H., 2016. A novel method for reliability and risk evaluation of wind energy conversion systems considering wind speed correlation. *Frontiers in Energy*, **10(1)**, 46-56, <https://doi.org/10.1007/s11708-015-0384-4>
- Nedjari, H.D., Guerri, O., Saighi, M., 2017. CFD wind turbines wake assessment in complex topography. *Energy Conversion and Management*, **138 (2017)**, 224–236, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.070>
- Özcan, S., 2001. İstatiksel Proses Kontrol Tekniklerinden Pareto Analizi ve Çimento Sanayiinde Bir Uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, **2(2)**, 151-174,
- Ramachandra, T.V., Shruthi, B.V., 2005. Wind Energy Potential Mapping in Karnataka, India, using GIS. *Energy Conversion and Management*, **(46)(2005)**, 1561–1578, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.07.009>
- Rolik, Y., 2017. Risk Management in Implementing Wind Energy Project. *Procedia Engineering*, **178(2017)**, 278 – 288, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.115>

- Shafiee, M., Dinmohammadi, F., 2014. An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore. *Energies*, **7(2)**, 619-642, <https://doi.org/10.3390/en7020619>
- Shu, Z.R., Li, Q.S., He, Y.C., Chan, P.W., 2016. Observations of offshore wind characteristics by Doppler-LiDAR for wind energy applications. *Applied Energy*, **169(2016)**, 150–163, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.135>
- Su, X., Deng, Y., Mahadevan, S., Bao, Q., 2012. An Improved Method For Risk Evaluation in Failure Modes and Effects Analysis of Aircraft Engine Rotor Blades. *Engineering Failure Analysis*, **26(2012)**, 164-174, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.009>
- Şen, Z., 1999. Terrain Topography Classification for Wind Energy Generation. *Renewable Energy*, **(16)(1999)**, 904–907, [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00304-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00304-8)
- Tarawneh, Q.Y., Şahin, A.D., 2003. Regional wind energy assessment technique with applications. *Energy Conversion and Management*, **(44)(2003)**, 1563–1574, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00164-4)
- Tazi, N., Châtelet, E., Bouzidi, Y., 2017. Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind Turbine Reliability Analysis. *Energies*, **10(3)**, 276, <https://doi.org/10.3390/en10030276>
- Wang, Y.M., Chin, K.S., Poon Gary Ka, K., Yang, J.B., 2009. Risk Evaluation in Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy Weighted Geometric Mean. *Expert Systems with Applications*, **36(2009)**, 1195-1207, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.028>
- Xiao, N., Huang, H.Z., Li, Y., He, L., Jin, T., 2011. Multiple Failure Modes Analysis And Weighted Risk Priority Number Evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, **18(2011)**, 1162-1170, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004>
- Xinyao, J., Yongjun, H., Fuchao, L., 2017. Research on the evaluation of wind power projects of investment risk. *Procedia Computer Science*, **111(2017)**, 388–398, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.039>
- Yssaad, B., Abene, A., 2015. Rational Reliability Centered Maintenance Optimization for power distribution systems. *Electrical Power and Energy Systems*, **73(2015)**, 350–360, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.015>

Vigna caracalla L. Verdc. Bitkisinde *In Vitro* Klonal MikroçoğaltımHalide Hande GÜNGÖR^{1*}, Begüm GÜLER², Meltem BAYRAKTAR³, Aynur GÜREL⁴^{1*} Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji Anabilim Dalı, İzmir.² Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, İzmir.³ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, Kırşehir.⁴ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İzmir.

Sorumlu yazar* e-posta: handegunr@gmail.com

ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-4155-4926

e-posta: begumakyol.ege@gmail.com

ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9970-2111

e-posta: meltembayraktar5@gmail.com

ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7569-6925

e-posta: aynurgurel@gmail.com

ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7002-9752

Geliş Tarihi: 17.10.2019

Kabul Tarihi: 18.08.2020

Öz

Vigna caracalla L. Verdc., "İzmir sarmaşığı" olarak da adlandırılan, hoş kokulu güzel çiçekleriyle dikkat çeken bir süs bitkisidir. Bu çalışmada, *Vigna caracalla* L. Verdc. bitkisinde *in vitro* klonal mikroçoğaltımın gerçekleştirilmesi için etkili bir protokolün geliştirilmesi amaçlanmıştır. Tohumlar, farklı sterilizasyon yöntemlerine maruz bırakıldıktan sonra MS besin ortamlarında kültüre alınmışlar. En yüksek sterilizasyon (%93.33) oranı (%93.33); 1 dk %70 etil alkol, 4 dk %0.1 HgCl₂ uygulamasının ardından, 7 saat suda bekletilen tohumlarda elde edilmiştir. En yüksek çimlenme yüzdesi (%95.24), N₆ besin ortamı içeren 250 mL'lik erlenlerde gözlenmiştir. En yüksek ortalama sürgün uzunluğu (5.05 cm) 1 mg/L IBA + 0.5 mg/L BAP içeren MS besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarından elde edilmiştir. Jelleştirici ajan, ışık şiddeti ve eksplant tipinin sürgün rejenerasyonuna etkisinin belirlenmesi için yapılan denemelerde ise en yüksek çoğaltım katsayısı (1.71) ve yaprak boyu (0.82 cm), Duchefa agar ile katılaştırılmış N₆ besin ortamında 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan nod eksplantlarından elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, fazla hiperhidrisite göstermeyen ve çoğaltım oranı daha yüksek olan 16 adet klonun mikroçoğaltım denemelerinde uygun reaksiyon verdiği belirlenmiştir. En yüksek kök rejenerasyonu (%85.71), Fluka agar ile katılaştırılmış N₆ besin ortamındaki 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan sürgün ucu eksplantlarında saptanmıştır. Köklü sürgünler, %70 başarı yüzdesi ile aklimatize edilmişlerdir.

Anahtar kelimeler

Vigna caracalla L.
Verdc.; *In vitro*; Klonal
mikroçoğaltım;
Çoğaltım katsayısı

In Vitro* Clonal Micropropagation of *Vigna caracalla* L. Verdc.*Abstract**

Vigna caracalla L. Verdc. is an ornamental plant, having with its beautiful odorous remarkable flowers, named as "İzmir's ivy". In this study, it was aimed to develop an effective protocol for *in vitro* clonal micropropagation in *Vigna caracalla* L. Verdc. plant. The seeds were cultured in MS medium after exposed to different sterilization methods. The highest percentage of sterilization (93.33%) were achieved when the seeds were soaked in 70% ethyl alcohol for 1 min, 0.1% HgCl₂ for 4 min and then kept sterilized distilled water for 7 hours. The highest percentage of germination (95.24%) was observed in 250 mL Erlenmeyer flasks containing N₆ medium. The highest shoot length (5.05 cm) was obtained from shoot tip explants cultured in MS medium containing 1 mg/L IBA + 0.5 mg/L BAP. In the experiments carried out to determine the effect of gelling agent, light intensity and explant type on shoot regeneration, the highest multiplication coefficient (1.71) and leaf length (0.82 cm) was achieved in node explants cultured in N₆ medium solidified with Duchefa agar and exposed to 4200 lux light intensity. Within the scope of this study, it was determined that 16 clones that did not show much hyperhydricity and had higher multiplication rate gave appropriate responses for micropropagation experiments. The highest root regeneration (85.71%) was achieved from shoot tip explants cultured in N₆ medium solidified with Fluka agar and exposed to 4200 lux light intensity. The rooted plantlets were acclimatized with 70% success.

Keywords

Vigna caracalla L.
Verdc.; *In vitro*; Clonal
micropropagation;
Multiplication
coefficient

1. Giriş

Fabaceae (Leguminosae) familyasına ait *Vigna* cinsi, 100'den fazla yabancı tür içermektedir. Börülce (*V.*

unquiculata L. Walpers), maş fasulyesi (*V. radiata* L. Wilczek) ve azuki fasulyesi (*V. angularis* Willd. Ohwi) gibi kültür türlerinin de dahil olduğu, tarımsal açıdan

önemli bir taksondur (Takahashi *et al.* 2016). Güney Amerika (Brezilya, Bolivya, Paraguay, Arjantin, Peru, Ekvator ve Kolombiya) ve Orta Amerika (Guatemala, Nikaragua, Kosta Rika, Meksika ve Panama) bölgelerine özgü çok yıllık bir bitki olan *Vigna caracalla* (Etcheverry *et al.* 2008) türünün sinonim isimleri, *Phaseolus caracalla* L. ve *Cochlianthus caracalla* L.' dir (Int Kyn. 1). Ülkemizde "Salyangoz asması", "Salyangoz çiçeği", "Tirbuşon sarmaşığı", "Zülf-ü Aruz", "İzmir sarmaşığı" ya da "Selluka" olarak çeşitli isimlerle anılan bu türe Akdeniz ve Ege Bölgelerinde de rastlanılmaktadır (Int Kyn. 2, Int Kyn. 3, Int Kyn. 4) .

Bu bitkinin en önemli özelliği, kokusu *Stephanotis* (Madagaskar yasemini)'ne rakip olacak kadar güzel olan orkide benzeri çiçekleridir (Anderson and Asche 1994). Haziran-Eylül ayları arasında pembe, eflatun, soluk sarı ve beyaz renkli açan çiçekleri limon ve yasemin arası bir kokuya sahiptir. Albenili çiçeklere sahip olan *V. caracalla* sarılıcı bir bitki olması sebebiyle parmaklık, pergola ve çardaklarda kullanılmaktadır (Int Kyn. 5). Ayrıca zengin besin içeriğinden dolayı yem olarak da kullanılabilir (Etcheverry *et al.* 2008).

Bir zamanlar İzmir-Karşıyaka'nın simgesi haline gelmiş olan *V. caracalla* bitkisinin tohumlarının pahalı olması, düşük çimlenme oranı (Suleiman 2003), ve çiçeklerindeki tozlaşma zorluğu gibi nedenlerle üretimi sekteye uğramış ve alternatif üretim tekniklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Geleneksel çoğaltım tekniklerinin yanı sıra, modern *in vitro* teknikler bitkilerin hızlı ve kontrollü koşullar altında çoğaltılması için yeni imkanlar sunmaktadır. *V. caracalla* bitkisi ile ilgili bugüne kadar gerçekleştirilmiş bir doku kültürü çalışmasına rastlanılmamıştır. Ancak; doku kültürü teknikleri kullanılarak *Vigna* cinsine ait bazı türler başarılı bir şekilde çoğaltılmıştır (Dewir *et al.* 2016). *V. unguiculata* L. (Türk börülcesi cv. Akkız) türünde sürgün meristemleri kullanılarak *in vitro*

mikroçoğaltım (Aasim *et al.* 2008), *V. subterranea* (L.) Verdc. türünde *in vitro* sürgün ucu rejenerasyonu (Silué *et al.* 2016), *V. radiata* L. Wilczek. (Maş fasulyesi) türünde tuza toleranslı kallus hatlarının *in vitro* seleksiyonu ve tuza toleranslı bitkiciklerin rejenerasyonu (Rao and Patil 2012), *V. mungo* L. Hepper (siyah mercimek) türünde ise rejenerasyon çalışmaları ve kallus indüksiyonu gerçekleştirilmiştir (Adlinge *et al.* 2014, Saha *et al.* 2017).

Mevcut çalışmada; *V. caracalla* L. Verdc. türüne ait tohumların çimlendirilmesinden elde edilen sürgün ucu ve nod eksplantlarından etkili bir klonal mikroçoğaltım prosedürünün oluşturulması ve bu bitkinin yeniden biyoçeşitliliğe kazandırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bitkisel materyal

Bu çalışmada, *V. caracalla* bitkisine ait tohumlar başlangıç materyali olarak kullanılmıştır. Tohumlar "Zengarden Ev ve Bahçe" online satış ve paylaşım sitesinden temin edilmiştir. Tohum göbeği de denilen hilumdan itibaren ortalama çapları 0.64 cm olan koyu kahve rengindeki sert kabuklu *V. caracalla* tohumları (Şekil 1), yüzeysel olarak steril edildikten sonra laboratuvarında hazırlanan besin ortamlarında kültüre alınmışlardır. Çimlenen tohumlardan elde edilen *in vitro* fideciklerin sürgün ucu ve nod eksplantları rejenerasyon çalışmaları için eksplant kaynağı olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. *Vigna caracalla* bitkisinin tohumu (Bar=0.5 cm).

2.2. Yüzeysel tohum sterilizasyonu ve dormansinin kırılması

V. caracalla bitkisine ait sert kabuklu tohumların sterilizasyonu ve tohum dormansisinin kırılması için Çizelge 1'de belirtilen 4 farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yüzeysel steril edilen tohumların kabuklarına bisturi ucu yardımıyla çimlendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla çizik atılmış ve tohumlar 30 g/L sükröz içeren ve 3 g/L Gelrite (Duchefa-Biochemie) ile katılaştırılmış MS (Murashige and Skoog 1962) besin ortamında kültüre alınmışlardır (pH 5.8). Denemeler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve her bir tekerrür için 5 adet tohum kullanılmıştır. Kültürler, 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta, 24 ± 2 °C sıcaklıkta ve beyaz LED aydınlatmalı 3500 lüks ışık şiddetinde bekletilmişlerdir.

Çizelge 1. Yüzeysel tohum sterilizasyonu ve tohum dormansisinin kırılması için saf suda bekletilerek gerçekleştirilen uygulamalar.

1. uygulama	2. uygulama	3. uygulama	4. uygulama
1 dk %70'lik etil alkol muamelesi	1 dk %70'lik etil alkol muamelesi	1 dk %70'lik etil alkol muamelesi	1 dk %70'lik etil alkol muamelesi
3 dk %0.1'lik HgCl ₂ muamelesi	4 dk %0.1'lik HgCl ₂ muamelesi	3 dk %0.1'lik HgCl ₂ muamelesi	4 dk %0.1'lik HgCl ₂ muamelesi
3 kez steril saf su ile durulama	3 kez steril saf su ile durulama	3 kez steril saf su ile durulama	3 kez steril saf su ile durulama
7 saat saf suda bekletme	7 saat saf suda bekletme	3 saat saf suda bekletme	3 saat saf suda bekletme

2.3. Çimlenme denemelerinin kurulması

2.3.1. Farklı temel besin ortamları ve kültür kaplarının çimlenme üzerine etkisi

Farklı temel besin ortamları ve kültür kaplarının tohum çimlenmesi üzerine etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla çimlenme denemeleri kurulmuştur. Tohumlar, yüzeysel sterilizasyon için; 1 dk etil alkolde bekletmenin ardından 4 dk % 0.1' lik HgCl₂ ile muamele edilmişler, ardından 3 kez steril su ile durulandıktan sonra 7 saat süreyle tohum kabuğunun yumuşaması için saf suda bekletilmişlerdir. Yüzeysel olarak sterilizasyonu gerçekleştirilen tohumların kabuklarına çimlendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla çizik atılarak Çizelge 2'de belirtilen temel besin ortamlarında

kültüre alınmışlardır (Gelrite 3 g/L, pH 5.8). Farklı kültür kapları olarak 10 mL besin ortamı içeren 50 mL hacimli cam kültür tüpleri (23/24x140 mm) ve 50 mL besin ortamı içeren 250 mL hacimli erlenler kullanılmıştır. Denemeler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve her bir tekerrür için 7 adet tohum kullanılmıştır. Kültürler, 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta, 24±2 °C sıcaklıkta ve beyaz LED aydınlatmalı 3500 lüks ışık şiddetinde muhafaza edilmişlerdir.

Çizelge 2. Çimlenme denemeleri için kullanılan temel besin ortamları ve içerikleri*.

Bileşikler	Miktar (mg/L)		
	MS	WPM	N ₆
Makro Elementler			
NH ₄ NO ₃	1.650	400	----
KNO ₃	1.900	----	2.830
CaCl ₂	332,02	72,5	125,33
MgSO ₄	180,54	180,54	90,27
KH ₂ PO ₄	170	170	400
K ₂ SO ₄	----	990	----
(NH ₄) ₂ SO ₄	----	----	463
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	----	471.26	----
Mikro Elementler			
KI	0,83	----	0,8
H ₃ BO ₃	6,2	6,2	1,6
MnSO ₄ .H ₂ O	16,9	22,3	3,33
ZnSO ₄ .7H ₂ O	8,6	8,6	1,5
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,25	0,25	----
CuSO ₄ .5H ₂ O	0,025	0,25	----
CoCl ₂ .6H ₂ O	0,025	----	----
Na ₂ .EDTA	----	----	7,45
FeSO ₄ .7H ₂ O	----	----	5,57
FeNaEDTA	36,70	36,70	----
Organik Bileşikler			
Myo-Inositol	100	100	100
Nikotinic Asit	0,5	0,5	0,5
Pridoksin-HCl	0,5	0,5	0,5
Thiamin-HCl	0,1	1	1
Diğer Bileşikler			
Glisin	2	2	2
Sükröz	30.000	30.000	20.000

*MS (Murashige and Skoog 1962); WPM (Lloyd and McCown 1980), N₆ (Chu *et al.* 1975)

2.3.2. Farklı jelleştirici ajanlar ve kültür kaplarının çimlenme üzerine etkisi

Farklı jelleştirici ajan ve kültür kaplarının çimlenme üzerine etkisini belirleyebilmek amacıyla; yüzeysel steril edilen tohumların kabuklarına çimlendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla çizik atılarak tohumlar, Gelrite (3 g/L) veya plant agar (Duchefa-Biochemie) (7g/L) ile katılaştırılmış, 30 g/L sükröz ilave edilmiş MS besin ortamı içeren cam tüplerde veya 250 mL' lik erlenlerde kültüre alınmışlardır (pH 5.8).

Denemeler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve her bir tekerrürde 7 adet tohum olacak şekilde denemeler kurulmuştur. Kültürler, 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta, 24±2 °C sıcaklıkta ve beyaz LED aydınlatmalı 3500 lüks ışık şiddetinde muhafaza edilmişlerdir.

2.3.3. Farklı ışık şiddetlerinin çimlenme üzerine etkisi

Işık şiddetinin çimlenme üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla; tohumlar yüzeysel olarak steril edildikten sonra tohumların kabuklarına çimlendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla çizik atılarak WPM (Lloyd and McCown 1980) besin ortamı içeren cam kültür kaplarında kültüre alınmışlardır (sükroz 30 g/L, pH 5.8). Kültüre alınan tohumlar 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta, 24±2 °C sıcaklıkta, farklı ışık şiddetlerinde (3500 ve 4200 lüks) muhafaza edilmişlerdir. Denemeler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve her bir tekerrür 7 adet tohum içerecek şekilde denemeler kurulmuştur.

2.4. Mikroçoğaltım denemelerinin kurulması

Tohumların *in vitro*' da çimlendirilmesi sonucunda gelişen 14 günlük *in vitro* fideliklerden elde edilen sürgün ucu ve nod kısımları mikroçoğaltım çalışmaları için eksplant kaynağı olarak kullanılmıştır. Denemeler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve her bir tekerrür için 7 adet eksplant kullanılmıştır. Kültürler 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta, 24±2 °C' de ve beyaz LED aydınlatmalı 3500 lüks ışık şiddetinde muhafaza edilmişlerdir.

2.4.1. Farklı besin ortamı kompozisyonları ve eksplant tiplerinin mikroçoğaltım üzerine etkisi

Yaklaşık 2 cm uzunluğundaki sürgün ucu ve nod eksplantları; mikroçoğaltım denemeleri için Çizelge 3'de belirtilen besin ortamlarını (pH 5.8) içeren cam kültür tüplerinde kültüre alınmışlardır.

Çizelge 3. Mikroçoğaltım denemeleri için kullanılan besin ortamları.

Temel besin ortamı	Besin ortamı kodu	Jelleştirici ajan (g/L)
MS	MS	3 g/L Gelrite
	½ MS	
WPM	WPM	7 g/L Duchefa agar (Lot. No: B010856.10)
	½ WPM	
	N ₆	
N ₆	N-21	7 g/L Duchefa agar (Lot. No: 01209.01)
	N-22	7 g/L Duchefa agar (Lot. No: 01209.01)
	N-25	7 g/L Merck agar-agar
	N-26	7 g/L Fluka agar

*MS (Murashige and Skoog 1962); WPM (Lloyd and McCown 1980), N₆ (Chu et al. 1975)

2.4.2. Farklı ışık şiddetleri ve jelleştirici ajanların mikroçoğaltım üzerine etkisi

Farklı ışık şiddetleri ve jelleştirici ajanların mikroçoğaltım üzerine etkisini belirlemek amacıyla; Çizelge 3'te belirtilen 5 farklı jelleştirici ajan ile katılaştırılmış N₆ temelli besin ortamlarında (pH 5.8) kültüre alınarak 3500 lüks ışıkta muhafaza edilen yaklaşık 2 cm uzunluğunda sürgün ucu ve nod eksplantlarına ilave olarak, yine aynı besin ortamları ve eksplant tipleri kullanılarak kültür oluşturulmuş ve kültürler 4200 lüks ışık şiddetinde muhafaza edilmişlerdir.

2.4.3. Bitki büyüme düzenleyicileri ve eksplant tipinin mikroçoğaltım üzerine etkisi

Yaklaşık 2 cm uzunluğundaki sürgün ucu ve nod eksplantları; bitki büyüme düzenleyicileri ve eksplant tipinin mikroçoğaltım üzerine etkisinin belirlenmesi amacı ile Çizelge 4' de belirtilen besin ortamlarını (pH 5.8) içeren cam kültür tüplerinde kültüre alınmışlardır.

Çizelge 4. Farklı konsantrasyonlarda bitki büyüme düzenleyicileri içeren besin ortamları.

Temel besin ortamı	Besin ortamı kodu	Bitki büyüme düzenleyicileri (mg/L)
MS	BS1	0.25 BAP
	BS2	0.5 BAP
	BS3	1 BAP
	BS4	2 BAP
	HS1	0.5 IBA + 0.5 BAP
	HS2	0.5 IBA + 1 BAP
	HS3	0.5 IBA + 2 BAP
	HS4	1 IBA + 0.5 BAP
	HS5	1 IBA + 1 BAP
	HS6	1 IBA + 2 BAP

2.5. Aklimatizasyon

Genotip korunarak yapılan klonal mikroçoğaltım denemeleri sonucunda canlılığını devam ettiren 16 farklı klona ait 20 adet köklenmiş bitkicik aklimatize edilmiştir. Bunun için kültür kabından çıkarılan bitkiciklerin kökleri zarar görmeyecek şekilde su ile yıkanarak üzerindeki besin ortamı ve jelleştirici ajan kalıntıları uzaklaştırılmıştır. Bitkicikler daha sonra içerisinde torf bulunan 7 cm çapında küçük plastik bardaklara aktarılmıştır. Saksıların üzerleri nem kaybını önlemek amacıyla başlangıçta şeffaf poşetlerle örtülmüş ve aklimatizasyon işleminden 3 gün sonra 5 dk, 5 gün sonra 10 dk ve 7 gün sonra 30 dk süreyle bu poşetler her gün çıkarılarak hem bitkiler sulanmış hem de havalandırılmıştır. Yedinci gün sonunda bu poşetler tamamen çıkarılarak 13 gün boyunca sürgünler laboratuvar ortamında açık bir şekilde 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta, 24 ± 2 °C' de ve beyaz LED aydınlatmalı 3500 lüks ışık şiddetinde muhafaza edilmişlerdir. Toplam 20 günün ardından aklimatize olan bitkiler içinde torf bulunan daha büyük saksılara aktarılmışlardır.

2.6. Verilerin değerlendirilmesi

Denemeler tesadüf parselleri deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Denemelerden elde edilen verilerin ortalamaları ve standart hataları, SPSS 16.0 istatistik paket programı (SPSS Inc., Chicago, USA) kullanılarak yapılmıştır. Yapılan denemelerin etkileri tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Deneme sonuçlarının ortalamaları arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı bulunduğu durumlarda ortalamaların karşılaştırılması Duncan testine göre %5 hata sınırı esas alınarak yapılmış ve farklı harflerle ifade edilmiştir.

3. Bulgular

3.1. Yüzeysel tohum sterilizasyonu denemelerinden elde edilen sonuçlar

Yapılan 4 farklı sterilizasyon uygulaması sonucunda, 3. uygulamada %86.67; 1, 2 ve 4. uygulamalarda ise %93.33 oranında sterilizasyon başarısı elde edilmiştir. Çalışmada çimlenme yüzdesi %53.33 (3.

uygulama) ile %93.33 (2. uygulama) arasında değişim göstermiştir. 4 farklı uygulamanın gerek sterilizasyon başarısı ve gerekse çimlenme oranı üzerinde etkisi istatistiki olarak önemli bulunmamıştır ($p\geq 0.05$) (Çizelge 5).

Çizelge 5. Tohum sterilizasyon ve çimlenme yüzdeleri (%).

Uygulama no	Ortalama steril tohum yüzdesi (%) \pm SH	Ortalama çimlenen tohum yüzdesi (%) \pm SH
1	93.33 \pm 6.67 a	73.33 \pm 6.67 a
2	93.33 \pm 6.67 a	93.33 \pm 6.67 a
3	86.67 \pm 13.33 a	53.33 \pm 13.33 a
4	93.33 \pm 6.67 a	73.33 \pm 13.33 a
P Değeri	0.931	0.143

*Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekrerr için 5 tohum kullanılmıştır. Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre $P\leq 0.05$ seviyesinde önemlidir. SH: Standart Hata

3.2. Çimlenme denemelerinden elde edilen sonuçlar

3.2.1. Farklı besin ortamları ve kültür kaplarının çimlenme üzerine etkisi

Farklı temel besin ortamları ve kültür kaplarının *in vitro* tohum çimlenmesi üzerine etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen denemelerden elde edilen verilere yapılan varyans analizi sonucunda, "çimlenen tohum yüzdesi" $p\leq 0.01$ seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 6). En yüksek tohum çimlenme yüzdesi (%95.24) N₆ besin ortamı içeren erlenlerde kültüre alınan tohumlarda belirlenmiştir (Çizelge 6).

Tohum çimlenme denemelerinde bazı tohumların çoklu sürgün verdiği gözlenmiş ve bu parametre de ayrıca incelenmiştir. Yapılan varyans analizi sonucunda "çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi" $p\leq 0.01$ seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 6). En yüksek çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi (%38.10), N₆ besin ortamı içeren erlenlerde kültüre alınan tohumlarda gözlenmiştir (Çizelge 6).

Her iki kültür kabındaki farklı besin ortamlarında kültüre alınan tohumların, 3 ila 30 gün aralığında çimlendiği tespit edilmiştir. Erlenlerde çimlenen tohumların yaprak boylarının, cam tüpte çimlenenlere göre daha büyük olduğu da elde edilen veriler arasındadır (Şekil 2a ve Şekil 2b). Çimlenen tohumlardan gelişen çoklu sürgünlerin hepsi

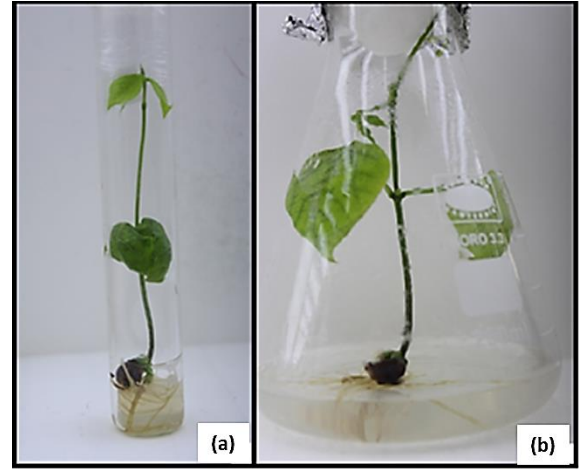
tohumun dip kısmından kardeş sürgün şeklinde gelişmiştir (Şekil 3a ve Şekil 3b).

Çoğaltım katsayısı çimlenen sürgünlerden elde edilen sürgün ucu ve nod eksplantlarının toplamı üzerinden hesaplanmıştır. Yapılan varyans analizine göre “çoğaltım katsayısı” parametresi $p \leq 0.01$ seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 6). En yüksek çoğaltım katsayısı (1.71) WPM besin ortamı içeren erlenlerde kültüre alınan tohumlarda gözlenmekle birlikte, $\frac{1}{2}$ N₆ besin ortamı içeren cam tüp ve erlenlerde kültüre alınan tohumlar hariç diğer tüm uygulamalar en yüksek çoğaltım kat sayısı elde edilen değerle aynı grupta yer almışlardır (Çizelge 6).

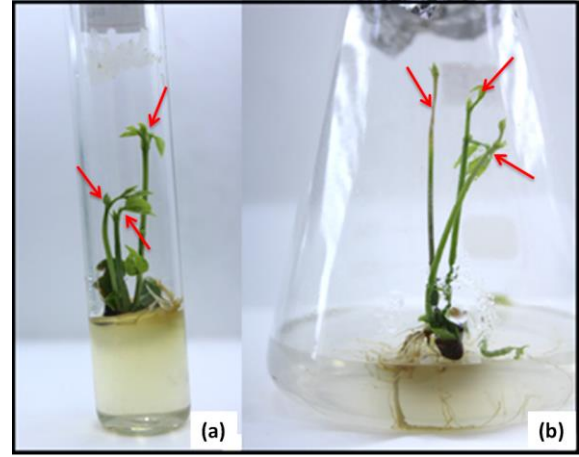
Çizelge 6. Farklı besin ortamları ve kültür kaplarında çimlenen tohum yüzdesi (%), çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi (%), çoğaltım katsayısı.

Besin ortamı	Kültür kabı	Çimlenen tohum yüzdesi (%) ± SH	Çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi (%) ± SH	Çoğaltım katsayısı ± SH
MS	Cam tüp	57.13 ± 16.48 bc	23.81 ± 4.76 ab	1.09 ± 0.37 a
	Erlen	61.87 ± 12.61 abc	4.76 ± 4.76 bc	1.47 ± 0.33 a
$\frac{1}{2}$ MS	Cam tüp	71.40 ± 8.26 ab	0.00 ± 0.00 c	1.00 ± 0.08 a
	Erlen	57.10 ± 14.30 bc	4.76 ± 4.76 bc	1.00 ± 0.08 a
WPM	Cam tüp	80.93 ± 4.77 ab	0.00 ± 0.00 c	1.38 ± 0.25 a
	Erlen	80.93 ± 9.53 ab	14.29 ± 8.25 bc	1.71 ± 0.00 a
$\frac{1}{2}$ WPM	Cam tüp	80.93 ± 4.77 ab	19.05 ± 12.60 bc	1.28 ± 0.08 a
	Erlen	52.38 ± 17.16 bc	0.00 ± 0.00 c	1.00 ± 0.36 a
N ₆	Cam tüp	80.93 ± 4.77 ab	19.05 ± 4.76 bc	1.62 ± 0.13 a
	Erlen	95.24 ± 4.77 a	38.10 ± 9.52 a	1.48 ± 0.29 a
$\frac{1}{2}$ N ₆	Cam tüp	33.27 ± 9.53 c	0.00 ± 0.00 c	0.00 ± 0.00 b
	Erlen	28.50 ± 8.26 c	0.00 ± 0.00 c	0.00 ± 0.00 b
P Değeri		0.003	0.001	0.000

*Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekerrür için 7 tohum kullanılmıştır. Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre $P \leq 0.05$ seviyesinde önemlidir. SH: Standart Hata



Şekil 2. In vitro koşullarda (a) Cam tüp ve (b) erlende çimlendirilmiş *Vigna caracalla* tohumlarından elde edilen in vitro fideciklerin gelişimleri.



Şekil 3. In vitro koşullarda (a) Cam tüp ve (b) erlende çimlendirilmiş *Vigna caracalla* tohumlarının dip kısımlarından çıkan kardeş sürgünler.

3.2.2. Farklı jelleştirici ajanlar ve kültür kaplarının çimlenme üzerine etkisi

Jelleştirici ajan ve kültür kabının çimlenmeye etkisini belirleyebilmek amacıyla gerçekleştirilen denemeler sonucunda çimlenme oranları %61.87-%85.71 (cam tüp*Gelrite) arasında, çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi %4.76-%23.81 (cam tüp*Gelrite) arasında ve çoğaltım katsayısı ise 0.85-1.48 (erlen*Gelrite) arasında değişim göstermiştir (Çizelge 7). Yapılan varyans analiz sonucuna göre farklı jelleştirici ajan ve kültür kaplarının incelenen üç faktör üzerine etkisi istatistiki açıdan önemsiz bulunmuştur ($p \geq 0.05$) (Çizelge 7).

Agar ile katılaştırılmış MS besin ortamı içeren erlenlerde oluşan çoklu sürgünlerin bir kısmı kardeş sürgün; bir kısmı tek bir sürgün uzadıktan sonra üst

kısımdan ikinci bir sürgün oluşumu şeklinde meydana gelmiştir. Gelrite'in ilave edildiği MS besin ortamı içeren cam tüpler ile erlenlerde oluşan çoklu sürgünler ve agar ile katılaştırılmış MS besin ortamı içeren cam tüplerde oluşan çoklu sürgünler tohumun dip kısmından kardeş sürgünler şeklinde oluşmuşlardır.

Çizelge 7. Farklı kültür kabı ve jelleştirici ajan uygulamaları sonucunda elde edilen çimlenen tohum yüzdesi (%), çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi (%) ve çoğaltım katsayısı.

Jelleştirici ajan tipi	Kültür kabı	Çimlenen tohum yüzdesi (%) ± SH	Çoklu sürgün oluşturan tohum yüzdesi (%) ± SH	Çoğaltım katsayısı ± SH
Gelrite	Cam tüp	85.71 ± 8.26 a	23.81 ± 4.76 a	1.09 ± 0.37 a
	Erlen	61.87 ± 4.77 a	4.76 ± 4.76 a	1.48 ± 0.33 a
Agar	Cam tüp	61.87 ± 4.77 a	4.76 ± 4.76 a	1.33 ± 0.08 a
	Erlen	71.43 ± 8.26 a	14.29 ± 8.25 a	0.85 ± 0.22 a
P Değeri		0.109	0.139	0.465

*Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekerrür için 7 eksplant kullanılmıştır. Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre $P \leq 0.05$ seviyesinde önemlidir. SH: Standart Hata

3.2.3. Farklı ışık şiddetlerinin çimlenme üzerine etkisi

Farklı ışık şiddetlerinin çimlenme yüzdesi üzerine etkisini incelemek amacıyla yapılan deneme sonucunda 3500 lüks ışık şiddetinde (%80); 4200 lüks ışık şiddetine (%60) göre daha yüksek çimlenme yüzdesi elde edilmiştir (Çizelge 8).

Çizelge 8. Farklı ışık şiddeti uygulamalarından elde edilen çimlenme yüzdeleri (%).

Işık şiddeti (lüks)	Kültüre alınan tohum sayısı (adet)	Çimlenen tohum yüzdesi (%) ± SH
4200	15	60 ± 11.55
3500	15	80 ± 11.55

*Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekerrür için 5 tohum kullanılmıştır. SH: Standart Hata

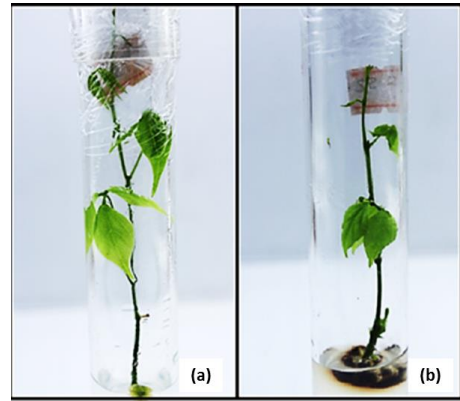
3.3. Mikroçoğaltım denemeleri

3.3.1. Farklı besin ortamı kompozisyonları ve eksplant tiplerinin mikroçoğaltım üzerine etkisi

Farklı besin ortamı kompozisyonları ve eksplant tiplerinin sürgün rejenerasyonu üzerine etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlara göre yapılan varyans analizi

sonucunda, "ortalama sürgün uzunluğu" ve "ortalama yaprak boyu" $p \leq 0.05$ seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 9). Eksplant başına en yüksek ortalama sürgün uzunluğu 4.52 cm ile WPM besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarında saptanmış ve bunu 4.36 cm ile $\frac{1}{2}$ MS besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantları takip etmiştir. Her iki uygulama istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır. En yüksek ortalama yaprak boyu (0,80 cm) MS besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarında elde edilmiştir. Çoğaltım katsayısı 0.43 (N-25*sürgün ucu)– 1.62 (WPM*sürgün ucu) arasında ve gözlenen hiperhidrisite yüzdesi %9.53 (N-22*sürgün ucu) - %52.33 (N₆*sürgün ucu) arasında değişim göstermiştir (Çizelge 9). Yapılan varyans analiz sonucuna göre farklı temel besin ortamları, jelleştirici ajan ve kültür kaplarının incelenen bu iki faktör üzerine etkisi istatistiki açıdan önemsiz bulunmuştur ($p \geq 0.05$) (Çizelge 9).

Nodlardan sürgünler genellikle tekli olarak gelişmekle birlikte, çok düşük oranda da bilateral sürgün oluşumları gözlenmiştir. Kültüre alınan eksplantların 2 hafta sonundaki gelişimleri Şekil 4'de gösterilmiştir.

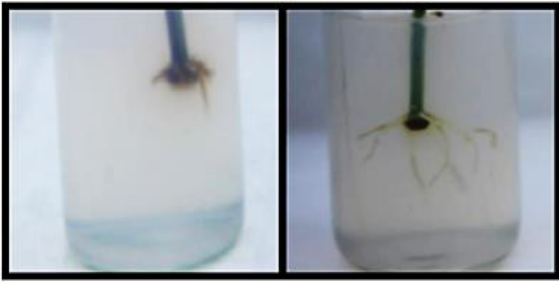


Şekil 4. Farklı besin ortamı kompozisyonlarında kültüre alınan (a) sürgün ucu ve (b) nod eksplantlarının 2 hafta sonraki gelişimleri.

3.3.2. Farklı ışık şiddetleri ve jelleştirici ajanların mikroçoğaltım üzerine etkisi

Farklı besin ortamı kompozisyonları ve eksplant tiplerinin mikroçoğaltım üzerine etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen denemelerden (N₆, N-21, N-22, N-25 ve N-26) elde edilen 3500 lüks ışık şiddeti verileri ile yine aynı ortamlarda kültüre

alınarak 4200 lüks ışık şiddetinde muhafaza edilen eksplantlardan alınan veriler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yapılan varyans analizi sonucunda, “ortalama sürgün uzunluğu” $p \leq 0.05$ seviyesinde, “ortalama yaprak boyu”, “çoğaltım katsayısı” ve “kök rejenerasyon yüzdesi” $p \leq 0.01$ seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 10). Buna göre; en yüksek ortalama sürgün uzunluğu 3.58 cm ile N-26 besin ortamında kültüre alınarak 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan sürgün ucu eksplantlarından elde edilmiştir. Bunu 3.57 cm ile N₆ besin ortamında kültüre alınarak 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan sürgün ucu eksplantları takip etmiştir. Her iki uygulama istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır. En yüksek ortalama yaprak boyu (0.82 cm) ve en yüksek çoğaltım katsayısı (1.71) N-21 besin ortamında 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan nod eksplantlarında gözlenmiştir (Çizelge 10). Kök rejenerasyon oranı (%85.71) ise en yüksek N-26 besin ortamında 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan sürgün ucu eksplantlarından elde edilmiştir. Köklenme denemelerinden elde edilen farklı uzunluktaki kökler Şekil 5’de gösterilmiştir. Kültürlerde gözlenen hiperhidrisite yüzdesi %4.96 (N26*3500*sürgün ucu) - %61.87 (N26*4200*sürgün ucu) arasında değişim göstermiştir. Varyans analiz sonucuna göre yapılan uygulamaların hiperhidrisite üzerine etkisi istatistiki açıdan önemsiz bulunmuştur ($p \geq 0.05$) (Çizelge 10).



Şekil 5. Mikroçoğaltım denemelerinden elde edilen *in vitro* bitkiciklere ait farklı uzunluktaki kökler.

3.3.3. Bitki büyüme düzenleyicileri ve eksplant tipinin mikroçoğaltım üzerine etkisi

Bitki büyüme düzenleyicilerinin mikroçoğaltım üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneyler sonucunda; en yüksek ortalama sürgün uzunluğu (5.05 cm), en yüksek ortalama yaprak

boyu (0,87 cm) ve en yüksek çoğaltım katsayısı (1.48) HS4 besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarından elde edilmiştir (Şekil 6). En yüksek hiperhidrisite yüzdesi %47.6 olarak; BS2*sürgün ucu, BS3*nod, HS1*nod, HS6*sürgün ucu kombinasyonlarında belirlenmiştir (Çizelge 11). Yapılan varyans analizi sonucunda bitki büyüme düzenleyicisi ve eksplant tipinin “ortalama sürgün uzunluğu” üzerine etkisi $p \leq 0.05$ seviyesinde önemli bulunurken, “ortalama yaprak boyu”, “çoğaltım katsayısı” ve “hiperhidrisite yüzdesi” üzerine etkisi istatistiki açıdan önemsiz bulunmuştur ($p \geq 0.05$) (Çizelge 11).



Şekil 6. HS4 besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantından gelişen *in vitro* sürgün.

3.4. Aklimatizasyon denemeleri

Denemeler sonucunda genotipi korunarak elde edilen 16 klona ait 20 bitkicik aklimatize edilmiş, 20. günün sonunda 9 klona ait 14 adet bitkicik ile %70 canlılık oranına ulaşılmıştır (Şekil 7). Sürgün ucu kökenli 11 adet aklimatize edilmiş bitkilerde yaşama oranı %72.7 iken; 9 adet nod kökenli aklimatize edilen bitkilerde yaşama oranı ise %66.7 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Saksılara aktarılmış bitkiler.

Çizelge 9. Farklı besin ortamı kompozisyonlarında kültüre alınan sürgün ucu ve nod eksplantlarından elde edilen eksplant başına ortalama sürgün uzunluğu (cm), ortalama yaprak boyu (cm), çoğaltım katsayısı ve hiperhidrisite yüzdesi (%).

Besin ortamı	Eksplant tipi	Ortalama sürgün uzunluğu (cm) ± SH	Ortalama yaprak boyu (cm) ± SH	Çoğaltım katsayısı ± SH	Hiperhidrisite yüzdesi (%) ± SH
MS	Sürgün ucu	2.81 ± 0.38 abc	0.80 ± 0.33 a	1.24 ± 0.24 a	33.30 ± 9.50 a
	Nod	3.08 ± 0.65 abc	0.60 ± 0.33 abcd	1.24 ± 0.31 a	28.57 ± 8.23 a
½ MS	Sürgün ucu	4.36 ± 0.58 a	0.68 ± 0.21 ab	1.52 ± 0.42 a	19.03 ± 12.58 a
	Nod	2.85 ± 0.72 abc	0.36 ± 0.08 abcde	0.98 ± 0.28 a	28.57 ± 8.23 a
WPM	Sürgün ucu	4.52 ± 0.69 a	0.48 ± 0.08 abcde	1.62 ± 0.35 a	23.80 ± 12.59 a
	Nod	3.31 ± 0.63 ab	0.56 ± 0.24 abcde	1.19 ± 0.42 a	42.83 ± 8.23 a
½ WPM	Sürgün ucu	3.76 ± 0.80 ab	0.65 ± 0.19 abc	1.29 ± 0.30 a	42.83 ± 8.23 a
	Nod	2.48 ± 0.05 bc	0.25 ± 0.08 bcde	0.95 ± 0.09 a	38.07 ± 4.73 a
N ₆	Sürgün ucu	3.19 ± 0.97 ab	0.43 ± 0.19 abcde	1.10 ± 0.33 a	52.33 ± 4.77 a
	Nod	2.70 ± 0.51 abc	0.08 ± 0.05 de	1.14 ± 0.08 a	23.80 ± 12.59 a
N-21	Sürgün ucu	2.81 ± 0.80 abc	0.43 ± 0.13 abcde	0.81 ± 0.10 a	14.30 ± 8.26 a
	Nod	2.24 ± 0.25 bc	0.11 ± 0.02 de	0.90 ± 0.13 a	33.30 ± 9.50 a
N-22	Sürgün ucu	2.40 ± 0.53 bc	0.37 ± 0.04 abcde	0.76 ± 0.10 a	9.53 ± 4.77 a
	Nod	2.14 ± 0.21 bc	0.14 ± 0.07 bcde	0.86 ± 0.00 a	23.80 ± 12.59 a
N-25	Sürgün ucu	1.24 ± 0.46 c	0.12 ± 0.10 cde	0.43 ± 0.14 a	23.83 ± 4.77 a
	Nod	1.95 ± 0.28 bc	0.11 ± 0.04 de	0.76 ± 0.13 a	33.33 ± 4.73 a
N-26	Sürgün ucu	2.43 ± 0.34 bc	0.39 ± 0.08 abcde	1.00 ± 0.08 a	23.80 ± 17.15 a
	Nod	2.12 ± 0.13 bc	0.05 ± 0.01 e	0.86 ± 0.08 a	23.83 ± 4.77 a
P Değeri		0.023	0.028	0.144	0.256

*Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekerrür için 7 eksplant kullanılmıştır. Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre $P \leq 0.05$ seviyesinde önemlidir. SH: Standart Hata

Çizelge 10. Farklı jelleştirici ajanlarla katılaştırılmış besin ortamları ve farklı ışık şiddetlerinde kültüre alınan sürgün ucu ve nod eksplantlarından elde edilen ortalama sürgün uzunluğu (cm), ortalama yaprak boyu (cm), çoğaltım katsayısı, kök rejenerasyon yüzdesi (%), hiperhidrisite yüzdesi (%).

Besin ortamı	Işık şiddeti (lüks)	Eksplant tipi	Ortalama sürgün uzunluğu (cm) ± SH	Ortalama yaprak boyu (cm) ± SH	Çoğaltım katsayısı ± SH	Kök rejenerasyon yüzdesi (%) ± SH	Hiperhidrisite yüzdesi (%) ± SH
N ₆	3500	Sürgün ucu	3.19 ± 0.97 ab	0.43 ± 0.19 abcde	1.10 ± 0.33 bc	42.86 ± 16.50 bcde	52.33 ± 4.77 a
		Nod	2.70 ± 0.51 abc	0.08 ± 0.05 e	1.14 ± 0.08 bc	28.57 ± 8.25 cdef	23.80 ± 12.59 a
	4200	Sürgün ucu	3.57 ± 0.48 a	0.68 ± 0.17 ab	1.19 ± 0.29 abc	28.57 ± 21.82 cdef	42.83 ± 16.48 a
		Nod	2.74 ± 0.32 abc	0.23 ± 0.13 cde	1.28 ± 0.17 ab	9.52 ± 9.52 ef	28.57 ± 14.27 a
N-21	3500	Sürgün ucu	2.81 ± 0.80 abc	0.43 ± 0.13 abcde	0.81 ± 0.10 bcd	47.62 ± 9.52 bcd	14.30 ± 8.26 a
		Nod	2.24 ± 0.25 abc	0.11 ± 0.02 e	0.90 ± 0.21 bcd	9.52 ± 4.76 ef	33.30 ± 9.50 a
	4200	Sürgün ucu	2.89 ± 0.81 ab	0.46 ± 0.26 abcde	1.09 ± 0.33 bc	57.14 ± 8.25 abc	19.03 ± 12.58 a
		Nod	3.14 ± 0.20 ab	0.82 ± 0.21 a	1.71 ± 0.25 a	71.43 ± 8.25 ab	42.83 ± 8.23 a
N-22	3500	Sürgün ucu	2.40 ± 0.53 abc	0.37 ± 0.05 abcde	0.76 ± 0.10 bcd	28.57 ± 8.25 cdef	9.53 ± 4.77 a
		Nod	2.14 ± 0.21 abc	0.14 ± 0.07 cde	0.86 ± 0.00 bcd	0.00 ± 0.00 f	23.80 ± 12.59 a
	4200	Sürgün ucu	3.19 ± 0.47 ab	0.56 ± 0.12 abc	1.24 ± 0.13 ab	33.33 ± 12.60 cdef	33.33 ± 19.03 a
		Nod	1.86 ± 0.04 bc	0.05 ± 0.05 e	0.81 ± 0.05 bcd	0.00 ± 0.00 f	23.83 ± 4.77 a
N-25	3500	Sürgün ucu	1.24 ± 0.47 c	0.12 ± 0.10 de	0.43 ± 0.14 d	9.52 ± 9.52 ef	23.83 ± 4.77 a
		Nod	1.95 ± 0.28 abc	0.11 ± 0.04 e	0.76 ± 0.13 bcd	9.52 ± 9.52 ef	33.33 ± 0.00 a
	4200	Sürgün ucu	1.79 ± 0.14 bc	0.19 ± 0.05 cde	0.62 ± 0.09 cd	42.86 ± 0.00 bcde	28.53 ± 14.27 a
		Nod	2.88 ± 0.76 ab	0.15 ± 0.07 cde	1.05 ± 0.05 bc	33.33 ± 12.60 cdef	9.53 ± 9.53 a
N-26	3500	Sürgün ucu	2.43 ± 0.34 abc	0.39 ± 0.07 abcde	1.00 ± 0.08 bc	52.38 ± 4.76 bcd	23.80 ± 4.68 a
		Nod	2.12 ± 0.13 abc	0.05 ± 0.01 e	0.86 ± 0.08 bcd	19.05 ± 4.76 def	23.83 ± 4.77 a
	4200	Sürgün ucu	3.58 ± 0.26 a	0.73 ± 0.17 ab	1.24 ± 0.13 ab	85.71 ± 8.25 a	61.87 ± 19.07 a
		Nod	3.39 ± 0.20 ab	0.53 ± 0.15 abcd	1.33 ± 0.13 ab	38.10 ± 17.17 bcde	33.30 ± 17.15 a
P Değeri			0.026	0.000	0.002	0.000	0.125

* Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekerrür için 7 eksplant kullanılmıştır. Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre $P \leq 0.05$ seviyesinde önemlidir. SH: Standart Hata

Çizelge 11. Farklı konsantrasyonlarda bitki büyüme düzenleyicileri içeren MS temelli besin ortamlarında kültüre alınan sürgün ucu ve nod eksplantlarından elde edilen ortalama sürgün uzunluğu (cm), ortalama yaprak boyu (cm), çoğaltım katsayısı ve hiperhidrisite yüzdesi (%).

Besin ortamı	Eksplant tipi	Ortalama sürgün uzunluğu (cm) ± SH	Ortalama yaprak boyu (cm) ± SH	Çoğaltım katsayısı ± SH	Hiperhidrisite yüzdesi (%) ± SH
BS1	Sürgün ucu	2.57 ± 0.52 bcd	0.15 ± 0.04 a	0.95 ± 0.17 a	28.53 ± 8.23 a
	Nod	1.67 ± 0.07 cd	0.11 ± 0.04 a	0.71 ± 0.00 a	33.33 ± 4.73 a
BS2	Sürgün ucu	2.71 ± 0.59 bcd	0.33 ± 0.07 a	1.00 ± 0.08 a	47.60 ± 9.50 a
	Nod	2.31 ± 0.29 bcd	0.19 ± 0.09 a	0.90 ± 0.13 a	42.80 ± 0.00 a
BS3	Sürgün ucu	2.60 ± 0.79 bcd	0.41 ± 0.20 a	1.05 ± 0.27 a	33.30 ± 9.50 a
	Nod	2.45 ± 0.29 bcd	0.33 ± 0.17 a	0.81 ± 0.05 a	47.60 ± 12.59 a
BS4	Sürgün ucu	1.55 ± 0.15 cd	0.26 ± 0.08 a	0.57 ± 0.08 a	38.10 ± 9.50 a
	Nod	2.05 ± 0.41 bcd	0.24 ± 0.13 a	0.81 ± 0.17 a	42.83 ± 16.48 a
HS1	Sürgün ucu	3.19 ± 0.60 bcd	0.20 ± 0.03 a	1.10 ± 0.25 a	29.47 ± 13.33 a
	Nod	2.10 ± 0.08 bcd	0.12 ± 0.01 a	1.00 ± 0.22 a	47.60 ± 9.50 a
HS2	Sürgün ucu	3.74 ± 0.64 ab	0.37 ± 0.14 a	1.05 ± 0.21 a	28.57 ± 8.23 a
	Nod	2.00 ± 0.18 bcd	0.13 ± 0.01 a	0.81 ± 0.05 a	33.33 ± 4.73 a
HS3	Sürgün ucu	3.48 ± 0.56 abc	0.39 ± 0.18 a	1.00 ± 0.17 a	28.57 ± 8.23 a
	Nod	1.71 ± 0.18 cd	0.13 ± 0.05 a	0.76 ± 0.05 a	42.83 ± 14.27 a
HS4	Sürgün ucu	5.05 ± 1.67 a	0.87 ± 0.42 a	1.48 ± 0.48 a	28.60 ± 0.00 a
	Nod	2.74 ± 0.63 bcd	0.38 ± 0.16 a	0.95 ± 0.17 a	33.30 ± 9.50 a
HS5	Sürgün ucu	3.21 ± 0.81 bcd	0.44 ± 0.10 a	1.05 ± 0.21 a	42.83 ± 8.23 a
	Nod	1.74 ± 0.16 cd	0.13 ± 0.04 a	0.71 ± 0.08 a	42.80 ± 0.00 a
HS6	Sürgün ucu	2.34 ± 0.33 bcd	0.18 ± 0.09 a	0.71 ± 0.08 a	47.60 ± 12.59 a
	Nod	1.33 ± 0.21 d	0.11 ± 0.09 a	0.67 ± 0.13 a	42.83 ± 8.23 a
P Değeri		0.013	0.092	0.297	0.886

*Uygulamalar üç tekerrürlü olarak yapılmış ve her bir tekerrür için 7 eksplant kullanılmıştır. Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre $P \leq 0.05$ seviyesinde önemlidir. SH: Standart Hata

4. Tartışma ve Sonuç

Tohumlar, ait oldukları popülasyonun genetik yapı ve çeşitliliğini temsil ettikleri için *in vitro* kültürlerin kurulmasında başlangıç materyali olarak kullanımları açısından tercih edilirler (Hayta *et al.* 2017). Çalışmamızda da olduğu gibi, şimdiye kadar *Vigna* cinsi ile yapılan birçok doku kültürü çalışmasında tohum, başlangıç materyali olarak kullanılmıştır (Aasim *et al.* 2008, Aasim *et al.* 2011; Rao and Patil 2012, Adlinge *et al.* 2014, Silué *et al.* 2016, Saha *et al.* 2017). *V. caracalla* gibi sert ve su geçirimsiz bir tohum kabuğuna sahip bitkilerde, tohum kabuğu; çimlenme için mekanik bir engel teşkil ederek, suyun emilimini ve bazen de gaz alışverişini önleyebilir (Hayta *et al.* 2017). Bu tip tohum kabuğu içeren tohumlarda dormansiyi kırmak, çimlendirmeyi kolaylaştırmak ve çimlenme oranını arttırmak amacıyla; sıcak suyla muamele, asit gibi çözeltilerle veya keskin bir bıçak yardımıyla tohum kabuğunun aşındırılması (skarifikasyon), tohumları su veya ozmotik çözeltide bekletme gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Böylelikle tohumun suyu çekmesi sağlanarak çimlenme

sürecinin başlamasına yardımcı olmaktadır (Hayta *et al.* 2017, Marty and Kettenring 2017). Mevcut çalışmada çimlenmeyi kolaylaştırmak ve çimlenme oranını arttırmak amacıyla tohum kabuğunun yumuşatılması için tohumlar yüzeysel sterilizasyon işleminden sonra 3 ve 7 saat süreyle steril suda bekletilmişlerdir. Uygulama sonucunda 7 saat suda bekletilen tohumlarda kabukların daha fazla yumuşadığı ve hatta bisturi yardımıyla daha kolay çizildiği belirlenmiştir. On ikinci günün sonunda yapılan gözlemler sonucunda, 4 dk %0.1'lik $HgCl_2$ çözeltisi ile steril edildikten sonra 7 saat steril suda bekletilen ve daha sonra çizilerek kültüre alınan tohumlarda sterilizasyon ve çimlenme oranı %93.33 gibi oldukça yüksek bir oranda gerçekleşmiştir (Çizelge 5). *V. caracalla*'nın sera koşullarında düşük çimlenme oranının olduğunun bilinmesi elde edilen bu sonucun başarılı olduğunu göstermektedir.

Bitki doku kültürlerinde başarıyı etkileyen en önemli faktörlerden biri kültür için en uygun temel besin ortamının belirlenmesidir. Uygun besin ortamının belirlenmesinde bitki türü veya çeşidine uygulanacak olan bitki doku kültürü tekniği önemlidir. Bitki türleri, besin ihtiyaçları bakımından

genellikle farklı oldukları için çeşitli besin ortamlarına farklı tepkiler verirler (Shirin *et al.* 2015). Mevcut araştırmada, hem *in vitro* çimlenme hem de mikroçoğaltıma en uygun temel besin ortamının belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

V. caracalla tohumlarının *in vitro* çimlenmesi için en uygun temel besin ortamının araştırıldığı denemede MS, 1/2 MS, WPM, 1/2 WPM, N₆, 1/2 N₆ temel besin ortamları kullanılmış ve en yüksek çimlenme oranı N₆ temel besin ortamında kültüre alınan tohumlarda gözlenmiştir (Çizelge 6). N₆ besin ortamında KNO₃ miktarı MS besin ortamına göre daha fazladır ve WPM besin ortamı azot kaynağı olarak farklı bileşikler içermektedir. Azot bitki yaşamı için önemlidir ve çoğunlukla bitkiler tarafından nitrat (NO₃⁻) formunda alınmaktadır. Hem proteinlerin hem de nükleik asitlerin bileşenini oluşturmaktadır (Bayraktar *et al.* 2020). Besin ortamına eklenen azotun formu ve miktarı kültürü etkilemektedir. Besin ortamlarında azot; nitrat, amonyum tuzları, aminoasitler ve kompleks organik bileşikler formunda yer almaktadır (Shirin *et al.* 2015). Yüksek konsantrasyonda amonyum iyonunun gizli toksisitesi ve ortam pH'nın kontrolünün sağlanması amacıyla, besin ortamlarının çoğu amonyum iyonlarından daha fazla nitrat içerir (Bayraktar *et al.* 2020). Nitrat iyi bir azot kaynağıdır, çünkü hücreler tarafından kolayca alınır, metabolize edilir ve ayrıca tohum dormansisinin kırılmasında da etkilidir (Shirin *et al.* 2015). KNO₃'ün tohum embriyosunda birikerek ozmotik etki oluşturduğu ve embriyonun su ve hatta oksijen alımını arttırabildiği, ayrıca, nitratın indirgenmesinin protein sentezini desteklediği ve buna bağlı olarak da embriyo büyümesinin devam etmesini sağladığı rapor edilmiştir (McIntyre *et al.* 1996). N₆ besin ortamındaki yüksek çimlenme oranının böyle bir etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Mikroçoğaltım için en uygun temel besin ortamının araştırıldığı denemelerde ise en yüksek eksplant başına ortalama sürgün uzunluğu, sırasıyla sürgün ucu*WPM (4.52 cm) ve sürgün ucu*1/2 MS (4.36 cm) kombinasyonlarında elde edilmiştir. Besin ortamlarında makro ve mikro elementlerin yetersizliği bitki hücre ve dokularının büyüme ve

gelişmeleri için olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Gürel vd. 2013). N₆ besin ortamının makro ve mikro besin elementi içeriği MS ve WPM besin ortamlarına göre çok daha düşük kalmaktadır (Çizelge 2). Bu nedenle, N₆ besin ortamı *V. caracalla* tohumlarının *in vitro* çimlenmesi için en uygun besin ortamı olmasına rağmen, mikroçoğaltım açısından diğer temel besin ortamlarına göre daha düşük tepkiler vermiştir. Çoğaltım katsayısı mikroçoğaltımda önemli bir faktördür. Her ne kadar çoğaltım katsayısı uygulamalar arasında istatistiki açıdan farklılık göstermese de "ortalama sürgün uzunluğu", "ortalama yaprak boyu" ve "çoğaltım katsayısı" faktörleri birlikte düşünüldüğünde *V. caracalla* türünün mikroçoğaltımında MS, 1/2 MS, WPM besin ortamlarının daha uygun olduğu ifade edilebilir. Gulati ve Jaiwal (1992) tarafından *V. radiata* (L.) Wilczek türünde gerçekleştirilen sürgün rejenerasyon çalışmasında; B5 vitaminleri ile desteklenmiş MS besin ortamında elde edilen ortalama sürgün uzunluğu (5.5 cm), çalışmamızda elde edilen en yüksek ortalama sürgün uzunluğu (4.52 cm) ile benzerlik göstermektedir. Mevcut çalışmada, en yüksek çoğaltım katsayısı (1.62), WPM besin ortamında kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarından elde edilmiş ve bu veriler Diallo vd. (2008) tarafından *V. unguiculata* türünde MS besin ortamında elde edilen ortalama sürgün uzunluğu (4.21 cm) ve çoğaltım katsayısı (1.81) ile uyumlu bulunmuştur. Gulati ve Jaiwal (1994) tarafından gerçekleştirilen ve farklı bir tür olan *V. radiata* (L.) Wilczek'de B5 vitaminleri içeren MS besin ortamında çoğaltım katsayısı ise 1 olarak belirlenmiştir.

In vitro kültürler; kültür kabı tipi, eksplant ile kültür kapağı arasındaki boşluk, kültür kapağının gaz geçirgenliği gibi faktörlerden etkilenebilmektedir (Bayraktar *et al.* 2015). Farklı kültür kapları ve temel besin ortamlarının çimlenme üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan denemelerde, en yüksek çimlenme yüzdesi N₆ besin ortamı içeren erlenlerde kültüre alınan tohumlarda elde edilmiştir (Çizelge 6). Ancak 1/2 MS ve 1/2 WPM besin ortamları kendi içlerinde değerlendirildiklerinde ise cam tüplerde çimlenme oranı erlenlere göre daha yüksek bulunmuştur. WPM ve 1/2 N₆ besin ortamları

kendi içlerinde değerlendirildiğinde ise her iki kültür kabında da çimlenme oranları hemen hemen aynı olmuştur. Bu denemede kültür kabından ziyade, besin ortamlarının çimlenme yüzdelerinde farklılık oluşturduğu düşünülmektedir. Kültür kabı ve farklı jelleştirici ajanların çimlenme üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan bir diğer çalışmamızda bu faktörlerin çimlenme üzerine etkili olmadıkları belirlenmiştir (Çizelge 7). Her iki denemede de erlenlerde gelişen *in vitro* fideliklerin yaprak boyutlarının cam tüplere göre daha büyük olduğu gözlenmiştir (Şekil 2a ve Şekil 2b). Bazı çalışmalarda kültür kabı hacim artışına bağlı olarak yaprak büyüklüğünün de arttığı rapor edilmiştir (McClelland and Smith 1990, Bayraktar *et al.* 2015). Bu nedenle, erlenlerde gelişen *in vitro* fideliklerde yaprak büyüklüğünün daha fazla olması erlen hacminin daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Işık, bitki gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Hem ışık yoğunluğu hem de ışık kalitesi bitkilerde morfogenezin uyarılmasında önemlidir. Işık; kloroplast olgunlaşması, yaprak şekli ve büyüme yönü gibi bitki gelişimindeki birçok süreci etkilemektedir (Reuveni and Evenor 2007). Mevcut çalışmada 2 farklı ışık şiddetinin (3500 ve 4200 lüks) çimlenme ve mikroçoğaltım üzerine etkileri incelenmiştir. Tohum çimlenme denemelerinde, 3500 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan tohumlarda 4200 lükse maruz bırakılan tohumlara göre daha yüksek çimlenme yüzdesi (%80) elde edilmiştir (Çizelge 8). Mikroçoğaltım denemelerinde ise, en yüksek "ortalama sürgün uzunluğu" (3.58 ve 3.57cm), "çoğaltım katsayısı" (1.71) ve "ortalama yaprak boyu" (0.82 cm) 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan eksplantlardan elde edilmiştir (Çizelge 10).

Bitki doku kültürlerinde rejenerasyonları yönlendirmek üzere farklı tiplerde ve dozlarda bitki büyüme düzenleyicileri besin ortamlarına ilave edilirler (Gürel vd. 2013). Mikroçoğaltımda genellikle çoklu sürgün oluşumunu desteklemek amacıyla ya sitokininler tek başına veya oksinlerle birlikte besin ortamlarına eklenirler (Röck-Okuyucu *et al.* 2016). Oksinlerin doğada, gövde ve internodyumların uzaması, fotoperiyodizm, apikal

dominansi, absisyon, köklenme gibi çeşitli fizyolojik olaylarla ilişkili olduğu ve doku kültürlerinde ise hücre bölünmesi ve uzaması ile kallus oluşumunu teşvik etmek ve kök farklılaşmasını sağlamak amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. DNA'yı oluşturan moleküllerden biri olan adenin türevi olan sitokininler, büyüme ve gelişmeyi teşvik etmek için kullanılırlar. Oksinlerle birlikte kullanıldıklarında ise genellikle hücre bölünmesini desteklerler. Yeniden farklılaşma (redifferentiation), bitki rejenerasyonu ve sürgün çoğaltımında etkilidir. Apikal dominansiyi azaltarak, koltuk altı (aksiler) sürgün oluşumunu desteklerler (Gürel vd. 2013). Mevcut çalışmada BAP tek başına veya BAP + IBA kombinasyonu şeklinde farklı dozlarda besin ortamına ilave edilerek mikroçoğaltım üzerine etkileri incelenmiştir. En yüksek "ortalama sürgün uzunluğu" (5.05 cm), "çoğaltım katsayısı" (1,48) ve "yaprak boyu" (0.87 cm) 1 mg/L IBA + 0.5 mg/L BAP ile desteklenmiş MS besin ortamında (HS4) kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarından elde edilmiştir (Çizelge 11). Besin ortamındaki oksin + sitokinin kombinasyonunun oranı rejenerasyonun yönünü belirlemektedir. En yüksek sürgün uzunluğu ve yaprak boyunun elde edildiği besin ortamında oksin (IBA) oranının sitokinin oranından (BAP) fazla olması, boy uzaması ve yaprak boyu uzamasını bitki büyüme düzenleyicisi içeren diğer ortamlara göre daha fazla teşvik etmiş olabilir. Çünkü yukarıda da belirtildiği gibi oksinlerin gerek hücre bölünmesi ve uzamasını ve gerekse de gövde ve internodyumların uzamasını sağladığı bilinmektedir.

En yüksek kök rejenerasyonu (%85.71), N-26 besin ortamında kültüre alınıp 4200 lüks ışık şiddetine maruz bırakılan sürgün eksplantlarından elde edilmiştir. Adlinge vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, bitki büyüme düzenleyicisi içermeyen besin ortamlarında köklenme elde edilememiştir. 0.1-0.25 mg/L NAA veya IBA ile desteklenmiş 1/2 MS besin ortamlarında ve 3000 lüks ışık şiddetinde kültüre alınan eksplantlarda en yüksek köklenme yüzdesi %76.6 olarak elde edilmiştir. Mevcut çalışmada N₆ temelli besin ortamında 4200 lüks ışık şiddetinde kültüre alınan sürgün ucu eksplantlarında, Adlinge vd. (2014) tarafından *V. mungo* L. Hepper türünde

yapılan çalışmadan daha yüksek köklenme yüzdesi elde edilmiştir. Diallo vd. (2008) tarafından *V. unguiculata* L. Walp. türünde gerçekleştirilen çalışmada ise bitki büyüme düzenleyicisi içermeyen yarı güçte MS besin ortamında %41.60 oranında köklenme elde edilmiştir. Bitki büyüme düzenleyicisi içermeyen besin ortamında ekstra bir *in vitro* köklendirme aşamasına gerek duyulmadan sürgün gelişimi ile birlikte köklenmenin gerçekleşmesi mikroçoğaltım açısından avantaj oluşturmaktadır.

Mevcut çalışmada *V. caracalla* bitkisinin sürgün rejenerasyonu esnasında gözlemlenen en büyük problemlerden biri hiperhidrisitedir. Hiperhidrik olan sürgünler, hiperhidrisite göstermeyenlere nazaran daha yüksek su içeriğine sahiptirler. Bu yüzden hiperhidrisite durumunda yapraklar ve gövde şeffaf ve camsı bir görünüm almakta ve bu durum birçok bitkinin mikroçoğaltımında ciddi fizyolojik bir problem teşkil etmektedir. Hiperhidrisitenin başlıca sebepleri olarak; düşük agar konsantrasyonu ve agar çeşidi, kullanılan temel besin ortamı, bazı sitokinler ve onların yüksek konsantrasyonları, yüksek NH₄ seviyeleri ve düşük K seviyeleri, kültür kabı içerisindeki yüksek nem ve etilen ve karbondioksit gibi gazların birikmesi gibi nedenler gösterilmektedir (Bayraktar 2013). Mevcut çalışmada, kullanılan temel besin ortamı, eksplant tipi, ışık şiddeti, agar çeşidi ve konsantrasyonu, bitki büyüme düzenleyicileri hiperhidrisite oranlarında bir farklılık oluşturmamış ve mikroçoğaltım amacıyla yapılan tüm denemelerde hiperhidrisite ile karşılaşmıştır. Mikroçoğaltım denemelerinde kültür kabı olarak tüp kullanılmıştır. Kültürler oluşturulduktan sonra tüp kapaklarının etrafı kontaminasyonu önlemek amacıyla streç film ile kaplanmıştır. Bu nedenle, kültür kabında yoğun bir nem oluştuğu ve gaz alışverişinin engellenmesiyle etilen ve karbondioksit gibi gazların biriktiği ve bu durumun kültürlerde hiperhidrisiteye sebep olduğu düşünülmüştür.

Hiperhidrisite sürecinin bazı bitkilerde geri döndürülebilir olduğu ve seraya transfer edildikten sonra hiperhidrik sürgünlerin oluşturduğu yeni sürgünlerin veya yaprakların, normal bitkilerinkine yakın bir morfoloji ve anatomiye sahip olabildikleri bilinmektedir (Bayraktar 2019). Mevcut çalışmada,

hiperhidrisite problemine sahip bazı klonların aklimatizasyonu sonrasında, bu problemin elimine edildiği gözlemlenmiştir. *In vitro* koşullarda elde edilen 20 adet köklü sürgün seçilerek aklimatize edilmiş ve % 70 oranında aklimatizasyon başarıları elde edilmiştir. Başarı ile aklimatize edilen bitkiler saksılara aktarılmıştır. Silué vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, *V. subterranea* L. Verdc. türü %70 başarı oranıyla aklimatize edilmiştir. *V. mungo* L. Hepper türünde ise %70-75 aklimatizasyon başarıları elde edilmiştir (Adlinge *et al.* 2014). Bu çalışmada belirlenen aklimatizasyon başarıları bu araştırmacıların bulgularıyla uyum içindedir.

Sonuç olarak; yapılan çalışma, *Vigna caracalla* bitkisinde gerçekleştirilen ilk *in vitro* çalışma olma özelliği taşımaktadır. Bu sebeple elde edilen veriler bundan sonra yapılacak çalışmalara yol gösterici olacaktır. Çalışma sonucunda ulaşılan veriler ışığında *V. caracalla*'nın ticari üretimi, biyoreaktörlerde kitlesel üretimi, sekonder metabolit çalışmaları, yeni çeşitlerin eldesine yönelik biyoteknolojik çalışmalar gibi çok farklı alanlarda çalışmalar gerçekleştirilebilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma, ALİYE ÜSTER VAKFI tarafından Eylül 2017-Eylül 2018 tarihleri arasında "Selluka-İzmir Sarmaşığı (*Vigna caracalla* L. verdc.) Bitkisinin *In vitro* Klonal Mikroçoğaltımı" isimli proje olarak desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

- Aasim, M., Khawar K.M. and Özcan, S., 2008. *In vitro* micropropagation from shoot meristems of Turkish cowpea (*Vigna unguiculata* L.) cv. Akkız. *Bangladesh Journal of Botany*, **37(2)**, 149-154.
- Aasim, M., Day, S., Rezaei, F., Hajyadeh, M., Mahmud, S.T. and Ozcan, S., 2011. *In vitro* shoot regeneration from preconditioned explants of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cv. Gokce. *African Journal of Biotechnology*, **10(11)**, 2020-2023.
- Adlinge, P.M., Samal, K.C., Kumara Swamy, R.V. and Ranjan Rout, G.R., 2014. Rapid *in vitro* plant regeneration of black gram (*Vigna mungo* L. Hepper) var. sarala, an important legume crop. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, **84(3)**, 823-827.
- Anderson, N.O. and Asche, P.D., 1994. Breakup of linkages for diagnostic traits in three-species congruity backcross (cbc) *Phaseolus* hybrids. *Journal*

- of the American Society for Horticultural Science, **29(5)**, 496.
- Bayraktar, M., 2013. "Gemlik" ve "Domat" zeytin (*Olea europaea* L.) çeşitlerinin *in vitro* koşullarda rejenerasyon potansiyellerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 193.
- Bayraktar, M., Hayta, S., Parlak, S. and Gurel, A., 2015. Micropropagation of centennial tertiary relict trees of *Liquidambar orientalis* Miller through meristematic nodules produced by cultures of primordial shoots. *Trees*, **29**, 999–1009.
- Bayraktar, M., 2019. Micropropagation of *Stevia rebaudiana* Bertoni using RITA® bioreactor. *HortScience*, **54 (4)**, 725–731.
- Bayraktar, M., Hayta-Smedley, S., Unal, S., Varol, N. and Gurel, A., 2020. Micropropagation and prevention of hyperhydricity in olive (*Olea europaea* L.) cultivar 'Gemlik'. *South African Journal of Botany*, **128 (2020)**, 264-273.
- Chu, C.C., Wang, C.C., Sun, C.S., Msu, C., Yin, K.C., Chu, C.Y., and Bi, C.Y., 1975. Establishment of an efficient medium for anther cultures of rice through comparative experiments on nitrogen sources. *Scientia Sinica*, **18**, 659-668.
- Dewir, Y.H., Murthy, H.N., Ammar, M.H., Alghamdi, S.S., Al-Suhaibani, N.A., Alsadon, A.A. and Paek, K.Y., 2016. *In vitro* rooting of leguminous plants: Difficulties, alternatives, and strategies for improvement. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, **57(4)**, 311-322.
- Diallo, M.S., Ndiaye, A., Sagna, M. and Gassama-Dia, Y.K., 2008. Plant regeneration from African cowpea variety (*Vigna unguiculata* L. Walp.) *African Journal of Biotechnology*, **7(16)**, 2828-2833.
- Etcheverry, A.V., Aleman, M.M. and Fleming, T.F., 2008. Flower Morphology, Pollination Biology and Mating System of the Complex Flower of *Vigna caracalla* (Fabaceae: Papilionoideae). *Annals of Botany*, **102**, 305–316.
- Gulati, A. and Jaiwal, P.K., 1992. *In vitro* induction of multiple shoots and plant regeneration from shoot tips of mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, **29**, 199-205.
- Gulati, A. and Jaiwal, P.K., 1994. Plant regeneration from cotyledonary node explants of mungbean (*Vigna Radiata* (L.) Wilczek). *Plant Cell Reports*, **13**, 523-527.
- Gürel, A., Hayta, S., Nartop, P., Bayraktar, M. ve Orhan-Fedakar, S., 2013. Bitki Hücre, Doku ve Organ Kültürü Uygulamaları, Ege Üniversitesi Basımevi, 47-66.
- Hayta, S., Bayraktar, M., Baykan Erel, S. and Gurel, A., 2017. Direct plant regeneration from different explants through micropropagation and determination of secondary metabolites in the critically endangered endemic *Rhaponticoides mykalea*. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, **151**, 20-28.
- Lloyd, G. and McCown, B.H., 1980. Commercially feasible micropropagation of mountain laurel, (*Kalmia latifolia*) by use of shoot tip culture. *Combined Proceedings of International Plant Propagators' Society*, **30**, 421-427.
- Marty, J.E. and Kettenring, K.M., 2017. Seed dormancy break and germination for restoration of three globally important wetland bulrushes. *Ecological Restoration*, **35(2)**, 138-147.
- McClelland, M.T. and Smith, M.A.L., 1990. Vessel type, closure, and explant orientation influence *in vitro* performance of five woody species. *HortScience*, **25(7)**, 797–800.
- McIntyre, G.I., Cessna, A.J. and Hsiao, A.I., 1996. Seed dormancy in *Avenafatua*: Interacting effects of nitrate, water and seed coat injury. *Physiologia Plantarum*, **97**, 291-302.
- Murashige, T. and Skoog, F., 1962. A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, **15**, 473-497.
- Rao S. and Patil, P., 2012. Biotechnology - Molecular Studies and Novel Applications for Improved Quality of Human Life. Reda Helmy Sammour (Ed.), Intech, 197-212.
- Reuveni, M. and Evenor, D., 2007. On the effect of light on shoot regeneration in petunia. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, **89**, 49–54.
- Röck-Okuyucu, B., Bayraktar, M., Akgun, I.H. and Gurel, A., 2016. Plant growth regulator effects on *in vitro* propagation and stevioside production in *Stevia rebaudiana* Bertoni. *HortScience*, **51(12)**, 1573–1580.
- Saha, P., Afrin, M., Mohiuddin, A.K.M. and Shohae, A.M., 2017. Development of an effective *in vitro* regeneration protocol for BARI Mash 2 (*Vigna mungo* L.) an important legume crop in Bangladesh. *Jahangirnagar University Journal of Biological Sciences*, **6(1)**, 23-33.

Shirin, F., Parihar, N.S. and Shah, S.N., 2015. Effect of nutrient media and KNO₃ on *in vitro* plant regeneration in *Saraca asoca* (Roxb.) Willd. *American Journal of Plant Sciences*, **6**, 3282-3292.

Silué, N., Koné, T., Soumahoro, A.B. and Kon, M., 2016. *In vitro* shoot tip multiplication of bambara groundnut [*Vigna subterranea* (L.) Verdc.]. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, **127**, 603-611.

Suleiman M.K., 2003. Seed germination of ornamental plants: a greenery plan contribution. *Archives of Agronomy and Soil Science*, **49**, 37-44.

Takahashi, Y., Somta, P., Muto, C., Iseki, K., Naito, K., Pandiyan, M., Natesan, S. and Tomooka, N., 2016. Novel Genetic Resources in the Genus *Vigna* Unveiled from Gene Bank Accessions. *Plos One*, **11(1)**, 1-18.

İnternet kaynakları

1- <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=VICA83>
(17.10.2019)

2- <https://www.kadirbekci53.blogspot.com/2013/09>
(14.10.2019)

3-
<https://www.missouribotanicalgarden.org/PlantFinder/PlantFinderDetails.aspx?taxonid=280333&isprofile=1&basic=Vigna%20caracalla> (14.10.2019)

4- <https://www.tohumdunyasi.com.tr/selluka-tohumu-izmir-sarmasigi-muhtesem-kokulu-cok-nadir-bitki-turu>
(14.10.2019)

5-
<https://izmirobm.ogm.gov.tr/SitePages/OGM/OGMBiliyormuydunuz.aspx?l=64cb0954-5394-4fcc-83e9-dc545a01a899&i=1> (14.10.2019)