

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 8 Sayı/Issue: 4 Aralık/December 2020



Gultekin OZDEMİR, *Suleyman Demirel University, TR (Baş Editör / Editor-in-Chief)*
Erdal AYDEMİR, *Suleyman Demirel University, TR*
Turgay AYDOĞAN, *Suleyman Demirel University, TR*
Mehmet AVCAR, *Suleyman Demirel University, TR*

Ali AGCAL, *Suleyman Demirel University, TR*
Çağlayan BALKAYA, *Suleyman Demirel University, TR*
Atilla BAYRAM, *Van Yuzuncu Yıl University, TR*
Mehmet Ali BELEN, *Artvin Coruh University, TR*
Habib GURBUZ, *Suleyman Demirel University, TR*
Baris GUREL, *Suleyman Demirel University, TR*
Tahir Serkan IRMAK, *Kocaeli University, TR*
Ecir Ugur KUCUKSILLE, *Suleyman Demirel University, TR*
Alper KUSCU, *Suleyman Demirel University, TR*
Mehmet Onur OLGUN, *Suleyman Demirel University, TR*
Mehmet OZCELIK, *Suleyman Demirel University, TR*
Savas OZUN, *Suleyman Demirel University, TR*
Yunus PAMUKOGLU, *Suleyman Demirel University, TR*
Olçay POLAT, *Pamukkale University, TR*
Hakan TONGAL, *Suleyman Demirel University, TR*
Volkan UZ, *Izmir Institute Of Technology, TR*
Kerim YAPICI, *Suleyman Demirel University, TR*
Demet YILMAZ, *Suleyman Demirel University, TR*

Michael G. KAY, *North Carolina State University, USA*
Yun-Chia LIANG, *Yuan Ze University, TW*
Ravi SANKAR, *University of South Florida, USA*
Alice E. SMITH, *Auburn University, USA*
Bedri TUC, *Baskent University, TR*
Erol TUTUMLUER, *University of Illinois at Urbana-Champaign, USA*
Fatma YALCINKAYA, *Technical University of Liberec, Czech Republic*
Gerhard-Wilhelm WEBER, *Middle East Technical University, TR*

Turgay AYDOĞAN, *Suleyman Demirel University, TR*

Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi editörlüğünde ve ULAKDİM DERGİPARK ev sahipliğinde yayımlanan Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD) yayın hayatına 2010 yılında başlamıştır. Mart, Haziran, Eylül ve Aralık Nisan, Ağustos ve Aralık aylarında olmak üzere yılda 4 sayı şeklinde yayım yapan uluslararası hakemli bir dergidir.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD), TÜBİTAK-ULAKBİM-DERGİPARK sistemine kabul edilmiştir. Dergi, TÜBİTAK-ULAKBİM Mühendislik ve Doğa Bilimleri Veri Tabanı (TR-DİZİN), Google Scholar ve alan indeksi olarak EBSCOHOST tarafından indekslenmektedir.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD) yayın dili Türkçe ve İngilizce olan araştırma makalesi, derleme ve çeviri türünden metinleri, yazım kurallarına uygun hazırlanmış olması koşuluyla internet üzerinden değerlendirmeye kabul eder. Değerlendirilmek üzere dergimize gönderilen metinlerin, daha önce yayınlanmamış, yayınlamak üzere kabul edilmemiş ve yayınlanmak için değerlendirme sürecinde olmaması gerekir. Değerlendirme sürecinde olan ve yayınlanan eserlerin sorumluluğu tamamen yazarlara aittir. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD) internet üzerinden e-dergi şeklinde yayınlanır ve değerlendirme süreci elektronik ortamda çift-körleme yöntemiyle takip edilir. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD)'nde yayınlanan tüm eserlerin yayın hakkı Süleyman Demirel Üniversitesi'ne aittir.

Journal of Engineering Sciences and Design (JESD) supported by Suleyman Demirel University Engineering Faculty, and hosted by ULAKBİM DERGİPARK, a national refereed journal, has been in publication since 2010 The journal will be published four times in a year as March, June, September, and December.

Journal of Engineering Sciences and Design (JESD) has been accepted for TUBITAK ULAKBİM DERGİPARK system in order to provide on-line journal management. JESD is now indexing by TUBITAK-ULAKBİM Engineering and Natural Sciences, Google Scholar, and EBSCOHOST.

Although the language of the journal is Turkish, manuscripts prepared in English is also welcome. JESD accepts and publishes on on-line open journal system manuscripts prepared as research paper, literature reviews, and translated articles as long as they are in accordance with the journal's writing guidelines. Manuscripts, which have been published previously, accepted for publication, or currently being considered for publication elsewhere, will not be considered for publication. The authors are solely responsible for the ideas and opinions expressed in the articles, of which Suleyman Demirel University cannot be held responsible. The Journal of Engineering Sciences and Design (JESD), is electronically managed, double-blinded journal from the submission of manuscripts to the publication. Suleyman Demirel University holds the copyright of all published material that appear in JESD.

TEHLİKELİ MADDELERİN KARAYOLU İLE TAŞINMASI SÜRECİNDE ORTAYA ÇIKAN ÇEVRESEL RİSKLERİN HATA AĞACI ANALİZİ (HAA) İLE DEĞERLENDİRİLMESİ	973-984
Nermin Merve YALÇINKAYA, Emine DEMİREL, Nuriye PEKER SAY	
NİKEL (II) İYONLARININ ATIK ÇAY'A BİYOSORPSİYONU: DENGİ, KİNİTİK VE TERMODİNAMİK ÇALIŞMALARİ	985-998
Mustafa ÖZTÜRK, Sayiter YILDIZ, Şükrü ASLAN	
YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİYLE YAZILIM TANIMLI AĞ UYGULAMASİ	999-1009
Sukran DEĞİRMENCİ, Derya YILTAS	
DERİN ÖĞRENME KULLANILARAK OPTİMUM JPEG KALİTE FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ	1010-1018
Emir ÖZTÜRK, Altan MESUT	
CİHAZDAN CİHAZA HABERLEŞMEDE GİRİŞİM GİDERİMİ YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASİ	1019-1030
Meryem TAŞER, Mustafa NAMDAR, Arif BAŞGÜMÜŞ	
COMPARATIVE STUDY OF PHOTOVOLTAIC ARRAY OPTIMUM TILT ANGLE AND ORIENTATION WITH MULTI-OBJECTIVE CONSIDERATION	1031-1041
Ali DURUSU, Ali ERDUMAN, Fikret YILDIZ	
ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ BELİRLENMESİNDE SARGI DONATISININ VE EKSENEL YÜKÜN ETKİSİ	1042-1052
Saeid FOROUGHİ, Rohullah JAMAL, Bahadır YÜKSEL	
DETERMINING THE EFFECT OF AIR CHAMBERS ON RUBBER INSULATION IN AUTOMOTIVE PARTS FOR SOUND ABSORPTION COEFFICIENT AND TRANSMISSION LOSS	1053-1061
Murat KORU, Orhan SERÇE, Osman İPEK, Hüseyin KARABULUT, Mehtap HİDİROĞLU	
OĞAL YAPI TAŞLARININ FİZİKO MEKANİK ÖZELLİKLERİYLE BÖHME AŞINMA DİRENCİNİN TAHMİNİ	1062-1071
Ali BOZDAĞ	
YALVAÇ-GELENDOST (ISPARTA) HAVZASİ SU KAYNAKLARININ HİDROJEOKİMYASİ VE KULLANILABİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	1072-1085
Ayşen DAVRAZ, Burcu BATUR	
TAMİR SÜRECİNİ İÇEREN GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİ İÇİN YENİ BİR ENVANTER MODELİ GELİŞTİRİLMESİ	1086-1098
Ramazan EROĞLU, Dr. Erdal AYDEMİR	
TÜRK İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KURUMSAL KAYNAK PLANLAMA (ERP) SİSTEMLERİNİN KULLANIMI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA	1099-1112
Hande ALADAĞ	
TAŞUCU KÖRFEZİNDE (MERSİN) SAHİL SEDİMANLARINDA AĞIR METAL İÇERİĞİNİN JEOKİMYASAL VE ÇOK DEĞİŞKENLİ İSTATİSTİK YAKLAŞIMLARLA İNCELENMESİ	1113-1125
Fusun YALCIN, Muthuswamy Ponniah JONATHAN, Mustafa Gurhan YALÇIN, Semiha ILHAN, Yasemin LEVENTELİ	
KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞLARI ARASİ AODV TABANLI YÖNLENDİRME ALGORİTMASININ BAŞARIM ANALİZİ	1138-1149
Seda SAVAŞÇI ŞEN, Murtaza CİCİOĞLU, Ali ÇALHAN	
TÜRKİYE VE CİVARI SİSMİK MOMENT TENSÖR KATALOĞU: 2016-2019	1150-1164
Selda ALTUNCU POYRAZ, Dogan KALAFAT, Yavuz GÜNEŞ, Fatih TURHAN, Remzi POLAT	
PVC SU BORULARININ İÇİNDEKİ SU SEVİYESİNİN MİKRO ŞERİT DİPOL ANTENLER İLE TESPİT EDİLMESİ	1165-1169
Ömer KASAR	
DONATILI ŞEV YAKININA OTURAN ŞERİT TEMEL DAVRANIŞININ SAYISAL İNCELEMESİ	1170-1179
Buse EMİRLER	
SIVI NİTROJEN İLE SUNİ DOLU YAPIMI VE ŞİMDİYE KADAR YAPILAN YAPAY DOLULARLA KARŞILAŞTIRILMASİ	1180-1189
Gokalp YILMAZ, Mehmet Eren UZ, Mohammad DAWOOD, Dilara KOP	
FOREX PİYASALARI İÇİN BAYES TEKNİĞİ İLE OTOMATİK AL/SAT SİNYALİ ÜRETİLMESİ	1190-1201
Özkan ÜNSAL, Mehmet KAYA	

YEŞİL SATIN ALMA VE YEŞİL TEDARİKÇİ SEÇİMİ: BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA	1202-1222
Ayberk SOYER, Beste TÜRKAY	
ÇOK BİLEŞENLİ KALIPLAMA YÖNTEMİNE UYGUN SÜREKLİ ELYAFLI TERMOPLASTİK KOMPOZİT AKÜ TAŞIYICI PARÇASININ GELİŞTİRİLMESİ	1223-1235
Ayça KÜÇÜKOĞLU, Gökçe ÖZYAPI, Atanur ACAR, Ali Ozan BAĞRIYANIK, Osman ÇOLPAN, Hafize ÇELİK, Yavuz Emre YAĞCI	
MARKOV MODEL TABANLI ÇİFT ENSTRUMANLI MÜZİK BESTELEME	1236-1247
Muratcan KILIÇ, H. İrem TÜRKMEN	
EŞ EKSENLİ ELEKTRO LİF ÇEKİM YÖNTEMİ İLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLİ KOMPOZİT NANOLİF ÜRETİMİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA	1248-1259
Gizem ÖZMEN, Sennur ALAY AKSOY	
HARİCİ REENFEKSİYONLARA BAĞLI TÜBERKÜLOZUN UYARLAMALI KALMAN FİLTRE TEMELLİ OPTİMAL KONTROLÜ	1260-1268
Meric CETİN, Selami BEYHAN	
GRAPHENE-TUNABLE MID-INFRAED METAMATERIALS BASED ON TITANIUM NITRIDE NANORODS	1269-1277
Erdem ASLAN, Ekin ASLAN	
Derleme Makalesi / Review Articles	
MADENCİLİKTE ATIKSU YÖNETİMİ VE KATI/SIVI AYRIMI	1278-1289
Savas ÖZÜN	
YÜKSEKÖĞRETİM KURUMLARININ HİZMET KALİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN KULLANILAN ÖLÇEK VE BOYUTLARIN ARAŞTIRILMASI	1290-1302
Melda KOKOÇ, Süleyman ERSÖZ	
ORGANİK ATIKLARIN YAPI MALZEMESİ OLARAK KULLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI	1303-1311
Muhammet ELMALI, İsmail DEMİR	
SOFRALIK ZEYTİN ÜRETİMİNDEN KAYNAKLANAN ATIKSULARIN ÖZELLİKLERİ VE ARITMA YÖNTEMLERİ	1312-1323
Deniz DÖLGEN, Mehmet Necdet ALPASLAN	



TEHLİKELİ MADDELERİN KARAYOLU İLE TAŞINMASI SÜRECİNDE ORTAYA ÇIKAN ÇEVRESEL RİSKLERİN HATA AĞACI ANALİZİ (HAA) İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Nermin Merve YALÇINKAYA^{1*}, Emine DEMİREL², Nuriye SAY¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 01330, Adana

² Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanı

Anahtar Kelimeler

Karayolu Taşımacılığı,
Tehlikeli Madde,
ADR,
Risk Analizi,
Hata Ağacı Analizi.

Öz

Tehlikeli madde taşımacılığı; süreç kapsamındaki taşıma, istifleme, depolama, elleçleme vb. faaliyetlerdeki riskler ve meydana gelebilecek sorunlar göz önüne alınarak, yasal çerçevede yürütülmektedir. Karayolları, tehlikeli maddelerin taşınması sırasında kullanılan en temel ulaştırma modudur. Karayolu ulaştırmasının bu kapsamda ağırlıklı olarak tercih edilmesi, meydana gelebilecek sorunların ve mevcut risklerin etki alanının diğer modlara kıyasla daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, karayollarında tehlikeli madde taşımacılığında meydana gelmesi muhtemel çevresel riskler araştırılmıştır. Amaç doğrultusunda, öncelikle konu ile ilişkili literatür taraması yapılmış ve yasal çerçeve araştırılmıştır. Ardından, uzman deneyimleri ve ramak kala kayıtlarına dayanarak tehlikeli maddelerin taşınması sırasında meydana gelebilecek 4 farklı senaryo belirlenmiş ve kalitatif risk analizi teknikleri arasında yer alan Hata Ağacı Analizi (HAA) yardımıyla süreç değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, senaryolar kapsamındaki hatalı olaylar/davranışlar doğrultusunda halk sağlığının ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine yönelik çözüm önerileri sunulmuştur.

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISKS DURING THE PROCESS OF DANGEROUS GOODS TRANSPORTATION BY ROAD BY FAULT TREE ANALYSIS (FTA)

Keywords

Road Transportation,
Dangerous Goods,
ADR,
Risk Analysis,
Fault Tree Analysis.

Abstract

Transportation of dangerous goods is carried out within a legal framework taking into account the risks and potential problems that may occur within the process (transport, stacking, storage, handling etc.). Highway is used as the fundamental mode of transportation of dangerous goods. Due to road transportation is mainly preferred in this context, it causes problems and potential risks to occur more than other modes. In this study, environmental risks that may occur in the transportation of dangerous goods on highways were investigated. 4 different scenarios that may occur during the transportation of dangerous goods have been determined based on expert experiences and near-miss records. These scenarios have assessed by Fault Tree Analysis (FTA) which is one of the qualitative risk analysis methods. As a conclusion of the study, proposals aiming at public health and environment are given in accordance with the erroneous conditions/behaviors within the scope of the scenarios.

Alıntı / Cite

Yalçinkaya, N.M., Demirel, E., Say, N., (2020). Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Taşınması Sürecinde Ortaya Çıkan Çevresel Risklerin Hata Ağacı Analizi (HAA) ile Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 973-984.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

N. M. Yalçinkaya, 0000-0002-0860-1498
E. Demirel, 0000-0002-4030-1225
N. Say, 0000-0003-2556-2002

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.04.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: nbaykan@cu.edu.tr, +90-322-338- 6545

1. Giriş (Introduction)

Ulaştırma sektörü kapsamında taşımacılık, sosyal ve iktisadi sektörlerin sürdürülebilirliğinde oldukça önemli bir faaliyettir. Tarihsel süreçte, kültürel yapı ile birlikte içinde bulunduğu çağın şartlarına göre değişim ve gelişim gösteren bu faaliyet, lojistik yönetiminin de en temel bileşenidir. Günümüzde toplumların gelişmesine ve ekonomik kalkınmasına katkı sağlayan taşımacılık faaliyetlerinin, üretim sektörleri başta olmak üzere her sektörde etkin rol oynadığı ifade edilebilir. Dünya Bankası (2010)'na göre küresel perspektifteki ticaret hacmi, gelişen verimli uluslararası lojistik ağ alt yapısına sahip ülkeler arasında büyüme göstermektedir. Türkiye perspektifinde lojistik yönetimi, ağırlıklı olarak ulaştırma, gümrükleme ve depolama hizmetlerini kapsamaktadır. Özellikle 2000 yılından bu yana, sektörel faaliyetlerin "lojistik" adı altında yürütülmeye başladığı görülmektedir (Akçetin, 2013). Lojistik Hizmetlerinin Geliştirilmesi Özel İhtisas Komisyon Raporu (2014)'nda, gelişen dünyada artan ticaret hacmi ile orantılı olarak lojistik sektörünün de öneminin arttığı, bu durumun lojistik hizmetlerinin daha etkin ve verimli yapılmasını zorunlu hale getirdiği ifade edilmektedir.

Üretilen bir ürünün tüketim yerine ulaştırılmasını sağlayan taşıma sürecinde, göz önünde bulundurulması ve gerekli önlemlerin alınması gereken öncelikli konulardan birisi taşınan yük tipidir. Günümüzde yük tipleri, üretim teknolojilerindeki modernleşme etkisiyle yapısal özellikleriyle belirli farklılıklar göstermektedir. Bu kapsamda, büyük çoğunluğunu kimyasal maddelerin oluşturduğu "tehlikeli madde" olarak adlandırılan yükler, yasal düzenlemeler ve çevresel güvenlik önlemleri uygulamaları açısından özellikle dikkat edilmesi gereken bir konudur. Tehlikeli yük taşımacılığı, ürünlerin fiziksel özellikleri, taşıma süreçlerindeki özel uygulamaları ve yapısal özelliklerinden kaynaklanan riskler yönünden, diğer taşıma süreçlerinden ayrılmaktadır. Bu durumun temel nedeni, tehlikeli maddelerin yüklenmesi/boşaltılması esnasında ya da farklı nedenlerle meydana gelen kazalar sonucu dökülmelerin insan ve çevre üzerinde ciddi bir risk potansiyeli oluşturması olarak ifade edilebilir. Tehlikeli madde taşımacılığı sürecinde, bu yük tipinin yapısal özelliği gereği güvenlik konusu öncelikli olmakta; multi-modal taşımalarda her taşıma türüne yönelik düzenlenen farklı yaptırımlar bulunmaktadır.

Taşımacılık sürecinde hedef mesafenin uzaklığı ve zamanlama, sektörel rekabet kapsamında oldukça önemli unsurlardır. Zaman içinde farklı modlardaki ulaşım sistemlerinin entegre edildiği lojistik süreçleri planlanmaya başlanmış; 1960'lı yıllara kadar yaygın olan "uni-modal sistem" yerini "multi-modal sistem"e bırakmıştır (Akçetin, 2013). Bu nedenle, taşıma türü değişimlerinde oluşabilecek sorun ve riskleri minimize edebilmek ve yaptırımları senkronize uygulayabilmek üzere, bir taşıma sürecinde yer alan tüm modlara yönelik yaptırımların bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, liman işletmeleri ile en fazla bağlantılı olan modun denizyolundan sonra karayolu olduğu düşünüldüğünde, denizyolu taşımacılığı süreçlerinde karayollarında tehlikeli yük taşımacılığının kurallarına yönelik geliştirilen farkındalık ve edinilen bilgi, bu süreçteki tüm paydaşlar için fayda sağlayacaktır.

Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması (ADR), tehlikeli maddelerin karayolu ile taşınması sürecinin insan sağlığına ve çevreye zarar verilmeden güvenli ve düzenli bir şekilde yürütülmesini esas almaktadır. Taşıma süreçlerinde uluslararası karayolu güvenliğinin artırılması, tehlikeli malların sınıflandırılması, paketlenmesi, etiketlenmesi ve diğer taşıma türleriyle olan uyumluluğun ortaya konması oldukça önemli kabul edilir. Bunun yanı sıra, tehlikeli atıklar da (kimyasal/biyolojik) ADR kapsamında değerlendirilmektedir.

ADR, Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu himayesinde 30 Eylül 1957'de Cenevre'de imzalanmış; 29 Ocak 1968'de yürürlüğe girmiştir. Türkiye'nin ADR'ye taraf olma başvuru süreci, 06.12.2005 tarihli ve 26015 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan 5434 sayılı "Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşmasına Katılmamızın Uygun Bulduğuna Dair Kanun" ile başlamıştır. 02.07.2010 tarihli ve 27629 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan 2010/547 sayılı "Bazı Anlaşmaların Yürürlük Tarihlerinin Tespit Edilmesi Hakkında Karar" doğrultusunda, 22.03.2010 tarihinde ADR taraf ülkesi olmuştur (KUGM, 2019).

Bu kapsamda, yürürlükte olan Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik, 24.04.2019 tarihli ve 30754 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanmıştır. Yönetmelik, "Kamuya açık karayoluyla yapılacak tehlikeli madde taşımacılığı faaliyetlerinin; insan sağlığı ve diğer canlı varlıklar ile çevreye zarar vermeden güvenli, emniyetli ve düzenli bir şekilde yürütülmesine ve bu faaliyetlerde yer alan; gönderenlerin, alıcıların, dolduranların, yükleyenlerin, boşaltanların, paketlenenlerin, tank-konteyner/portatif tank işletmecilerinin, taşımacıların ve tehlikeli maddeleri taşıyan her türlü taşıt sürücülerinin sorumluluk ve yükümlülüklerine ilişkin usul ve esasları belirlemeyi" amaçlar. Yönetmelik, 26/9/2011 tarihli ve 655 sayılı Ulaştırma ve Altyapı Alanına İlişkin Bazı Düzenlemeler Hakkında Kanun Hükmünde Kararnamenin 28 inci maddesine, 10/7/2018 tarihli ve 30474 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 1 sayılı Cumhurbaşkanlığı Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesinin 480 inci maddesi ile 497 nci maddesi ve 5434 sayılı Kanun ile kabul edilen Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşmasına dayanılarak hazırlanmıştır (Resmi Gazete, 2019).

Tehlikeli yük taşımacılığı süreçleri, konuya özel ve detaylı uygulamalara sahip olup, karar verme süreçlerinden uygulama düzeyine kadar birçok paydaşı doğrudan ilgilendirmektedir. Tehlikeli yük taşımacılığının kapsam genişliği, tehlikeli yük taşıma sürecindeki pratik uygulama esaslarının belirlenmesi ve uluslararası düzeyde bir uygulama standardı elde edilmesi gerekliliğini meydana getirmiştir (Özdikmen, 2016). Bu bağlamda, tehlikeli yük taşıma süreçlerinde uluslararası bütünlük sağlanabilmesine yönelik olarak Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması (ADR), Denizyoluyla Taşınan Tehlikeli Maddelere İlişkin Uluslararası Kod (IMDG-Code), IATA Tehlikeli Madde Düzenlemeleri (DGR) ve Tehlikeli Maddelerin Demiryoluyla Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Düzenlemeler (RID) gibi taşıma türlerinin sahip olduğu spesifik özelliklere uygun şekillerde düzenlemeler, anlaşmalar ve kodlar ilgili taşıma türünün (kara, deniz, hava) uluslararası alanda kabul görmüş kurum ve kuruluşları tarafından geliştirilmiştir (Akçetin, 2013). Uluslararası nitelikteki bu düzenlemelerin, anlaşmaların ve kodların işlevlerini yerine getirebilmeleri için ilgili ülkelerdeki ulusal mevzuat yapıları ile uyumlu hale getirilmeleri gerekliliği bulunmaktadır. Türkiye'ye bakıldığında, bu uyumlaştırma sürecinin denizyolu ile havayolu için tamamlandığı, karayolu için yeni başladığı, demiryolu için ise henüz başlamadığı söylenebilir.

Bu çalışma, tehlikeli madde taşımacılığı süreçlerinde ortaya çıkan çevresel risklerin ve kümülatif etkilerinin karayolu modu özelinde belirlenmesi ve bu doğrultuda sürdürülebilir çözüm önerilerinin geliştirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Bu kapsamda, risk analizi yöntemlerinden Hata Ağacı Analizi (HAA) kullanılarak, tehlikeli maddelerin taşınması sürecinde oluşması muhtemel riskleri önlemede etkili uygulamalar dört farklı senaryo ile sunulmuştur.

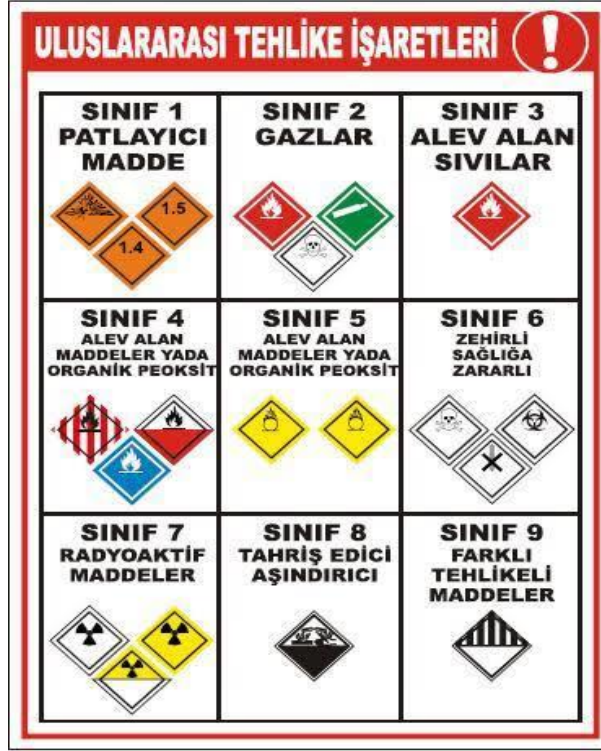
2. Tehlikeli Maddeler (Dangerous Goods)

ADR Konvansiyonu (2019)'na göre; tehlikeli maddeler; nitelikleri ve taşıma işlemi ile bağlantılı olarak; genel güvenliği ve düzeni, toplumu, hayat kaynaklarını, hayvanları ve bitkileri tehlikeye düşürebilecek olan maddelerdir. Tehlikeli maddeler dokuz sınıfa ayrılır (Tablo 1).

Tablo 1. Tehlikeli madde sınıfları (ADR, 2019). (Classification of dangerous goods)

Sınıf 1- Patlayıcı Maddeler/Nesneler
Sınıf 2.1- Yanıcı Gazlar
Sınıf 2.2- Yanıcı/Zehirli Olmayan Gazlar
Sınıf 2.3- Zehirli Gazlar
Sınıf 3- Alevlenir Sıvı Maddeler
Sınıf 4.1- Alevlenir Katı Maddeler
Sınıf 4.2- Kendiliğinden Tepkimeye Girmeye Yatkın Maddeler
Sınıf 4.3- Su ile Temasında Alevlenir Gaz Açığa Çıkaran Maddeler
Sınıf 5.1- Yükseltgen Maddeler
Sınıf 5.2- Organik Peroksitler (2007'de yılında değişmiştir; Alt sarı-üst kırmızı-orta alev).
Sınıf 6.1- Zehirli Maddeler
Sınıf 6.2- Bulaşıcı Maddeler
Sınıf 7- Radyoaktif Malzemeler
Sınıf 8- Aşındırıcı Maddeler
Sınıf 9- Muhtelif Tehlikeli Maddeler/Nesneler

Tehlikeli maddeleri taşıyan araçların ve taşıma konteynerleri ile tankların sahip olması gereken levhalar bulunmaktadır (Şekil 1). İşaretler uluslararası düzeyde olup, taşınan tehlikeli madde hakkında dikkatli olunması gerektiğini bildirmektedir. Ayrıca, tehlikeli maddelerin (özellikle kimyasalların) kutularında belirli işaretlerin bulunması gerekmektedir (Şekil 2). Tehlikeli maddelerin taşınması sırasındaki hatalar, aksaklıklar, maliyet kaygıları vb. durumlar ciddi sorunlara yol açar. Bu nedenle, tehlikeli madde taşımacılığı oldukça dikkatli yürütülmesi gereken ve sorumluluk gerektiren bir süreçtir. ADR Anlaşması'nda, tehlikeli madde taşımacılığında sorumlu paydaşlar ve görevleri net bir şekilde tanımlanmıştır. Bu süreçteki sorumlular; gönderici, paketleyici, yükleyici, doldurucu, taşıyıcı, araçta bulunan görevliler (sürücü ve diğerleri), teslim alan kişiler, tank/konteyner/depo işletmecileri olarak belirtilmiştir (Özer, 2011; ADR, 2019).



Şekil 1. Sınıflarına göre tehlikeli maddelerin işaretleri (TGD Bulletin, 2018). (Dangerous Goods Classes and Signs)



Şekil 2. Tehlikeli maddelerin işaretlenmesinde kullanılan belirli etiketler (TGD Bulletin, 2018). (Dangerous Goods Labels)

2.1. Tehlikeli Maddelerin Taşınma Türleri ve Taşınma Süreçleri (Transportation Types and Process of Dangerous Goods)

Tehlikeli madde taşımacılığı süreçlerinde, modlara yönelik belirli kurallar getirilmiştir. Bu kapsamda yer alan konvansiyonlar aşağıdaki gibidir (ADR, 2019):

- **IMDG (Denizlerde Tehlikeli Yük Taşınmasına İlişkin Düzenleme):** Tehlikeli yüklerin denizlerde taşınması ile ilgili kuralları belirleyen konvansiyonda, tehlikeli yüklerin taşınmasıyla ilgili uluslararası bir standart yer almaktadır. Beş bölümden oluşan konvansiyon; uygulama, tehlikeli maddelerin sınıflandırması, tehlikeli maddeleri paketlenme, tehlikeli maddeleri markalama/etiketleme ve dokümanlar, istif gerekleri ve yolcu gemilerinde bulunabilecek patlayıcı maddeler gibi bölümleri kapsamaktadır.
- **RID (Tehlikeli Yükün Demiryolu İle Uluslararası Taşımacılığın İlişkin Mevzuat):** Konvansiyon; tehlikeli maddelerin demiryolunda yükletilmesine, boşaltılmasına, aktarılmasına ve etiketlenmesine ilişkin kuralları ve ülkemizde ise TCDD hatlarında taşınması sırasında önlemleri kapsamaktadır.

- **ADNR (Nehirlerde Tehlikeli Yük Taşınmasına İlişkin Düzenleme):** Konvansiyon, tehlikeli maddelerin iç suyolları aracılığıyla taşınması sırasında uyulması gereken kuralları içermektedir.
- **IATA-DGR (Uluslar Arası Hava Taşımacılığı Birliği Tehlikeli Yük Mevzuatı):** Uçakla taşınabilecek tehlikeli maddelerin paketleme, taşınması kurallarını belirlemektedir. Uygulanabilirlik, kısıtlamalar, sınıflandırma, tanımlama, paketleme, işaretleme ve etiketleme, dokümantasyon, taşıma ve radyoaktif maddeler bölümlerini içermektedir.

2.2. Tehlikeli Maddelerin Taşınmasında Risk Analizi (Risk Analysis of Dangerous Goods Transportation)

Tehlikeli maddeler, doğrudan veya dolaylı olarak ekolojik faktörler, sosyal doku ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etki oluşturma potansiyeline sahiptir. Akçetin (2013)'e göre, bu maddelerin taşıdığı riskin temel nedeni, ekosistemi değiştirme kapasitelerinden kaynaklanır. Kasıtlı olarak (atma/dökme vb.) veya kaza yoluyla (sızıntı, egzoz ya da kaza sonucu dökülme vb.) bu maddeler çevresel faktörler ile temasa geçebilir. Tehlikeli maddelerin risk yönetimi Tablo 2'de verildiği gibi yönetilebilir.

Tablo 2. Tehlikeli maddelerin risk yönetimi (WHSQ, 2012; Akçetin, 2013). (Management of risks associated with dangerous goods)

Özellikleri doğrultusunda kategorize edilmesi ve tepkimeye girebilecek maddelerin ayrımı
Olası bir sorun ile ilgili bilgilendirme, eğitim ve tatbikat çalışmalarının yapılması
Yangın çıkmasını tetikleyici unsurların kontrolü
Korunması gereken hassas niteliğe sahip yerlerden uzak tutulması
Olası sızıntıların bertaraf edilmesi
Kişisel koruma ve güvenlik amaçlı ekipmanların temini ve muhafazası
Tehlikeli madde muhafaza alanlarına uyarıcı levhaların yerleştirilmesi
Tehlikeli maddelere yönelik oluşturulan güvenlik yönetim sisteminin belgelerinin kullanımı
Acil durum planlarının hazırlanması
Kullanım dışı depo/uygulama noktalarının temiz ve güvenli tutulması

Risk faktörü, mevcut bir durumun yol açacağı sorun veya potansiyel bir unsur ile doğrudan ilişkilidir. Benner (1978), risk faktörünü, hasar ve belirsizlik durumu olarak tanımlamaktadır. Risk analizi ise, farklı sistemler kapsamında çevre, sağlık vb. konularda öngörülen sorunlara yönelik risklerin ve bu risklerin şiddetine bağlı önlem düzeylerinin belirlendiği analitik karar verme süreçleridir. Bu analitik süreçlerde, konuya bağlı olarak nicel veya nitel kapsamda farklı tekniklerden yararlanılmaktadır (Ceylan ve Başhelvacı, 2011; Arslan vd., 2018; Kuzu vd., 2019; Kraidi vd., 2020; Shi vd., 2020).


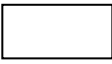



3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Risk değerlendirme süreçlerinde yararlanılan analitik araçlar; Birincil Risk Analizi, Ön Tehlike Analizi, Güvenlik Fonksiyon Analizi, Süreç/Sistem Kontrol Listeleri, Risk Haritası, Olursa Ne Olur? Analizi, Kinney Modeli, Ağırlıklandırılmış Ortalamalardan Sapma Tekniği, Hata Ağacı Analizi vb. olmak üzere oldukça çeşitlidir.

Çalışma kapsamında hata ağacı analizi (HAA) tekniği kullanılmıştır. Teknik kapsamında, tanımlanmış istenmeyen olay (kaza vb.) veya durumun nedenlerinin mantıksal kombinasyonu grafik olarak ifade edilmektedir. Sistemde tehlike olarak görülen tüm unsurların tanımlanmasında ve analizinde yürütülen süreci temsil eder. 1960'lı yıllardan bu yana kullanılan bu tekniğin en etkin güvenlik analizi yöntemi olduğu ifade edilebilir. Fonksiyonel hatanın ciddi sonuçlara yol açabileceği karmaşık teknik sistemlerde oldukça önemlidir (Lee vd., 1985; Ringdahl, 2001; Özkılıç, 2005; Kim vd., 2020). Sistematik karar verme süreçleri tüm dengelim mantığına dayanır ve 3 temel aşamada yürütülür; sistemin analizi, hata ağacının oluşturulması ve hata ağacının değerlendirilmesi.

HAA kapsamında risk derecesi araştırılan ana istenmeyen olay üst olay, daha ileri bir ayrıştırma olmaksızın üst olayı tetikleyen olay ise esas olay olarak gösterilir. Analizde yer alan 'veya'/'ve' kapıları çeşitli olaylar arasındaki ilişkiyi temsil eden mantıksal işaretlerdir. "ve" kapısı, sembol altında gösterilen tüm olayların, "veya" kapısı ise sembol altındaki olayların herhangi birinin gerçekleşmesi ile bir üst olayın gerçekleşeceğini ifade eder. Bunun yanı sıra kesme seti; hepsinin oluşması durumunda üst olayın meydana gelmesine neden olan herhangi bir hata ağacı grubu, en düşük kesme seti; hepsinin oluşması durumunda üst olayın meydana gelmesine neden olan asgari hata ağacı grubu, yol seti; gerçekleşmemesi durumunda üst olayın kesinlikle meydana gelmeyeceğinin görüldüğü hata ağacını başlatan bir gruptur (Menteş ve Helvacıoğlu, 2010; Şenel ve Şenel, 2013; Erdoğan, 2015). HAA kapsamında kullanılan temel semboller Tablo 3'te, bu tekniğin olumlu ve olumsuz yönleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

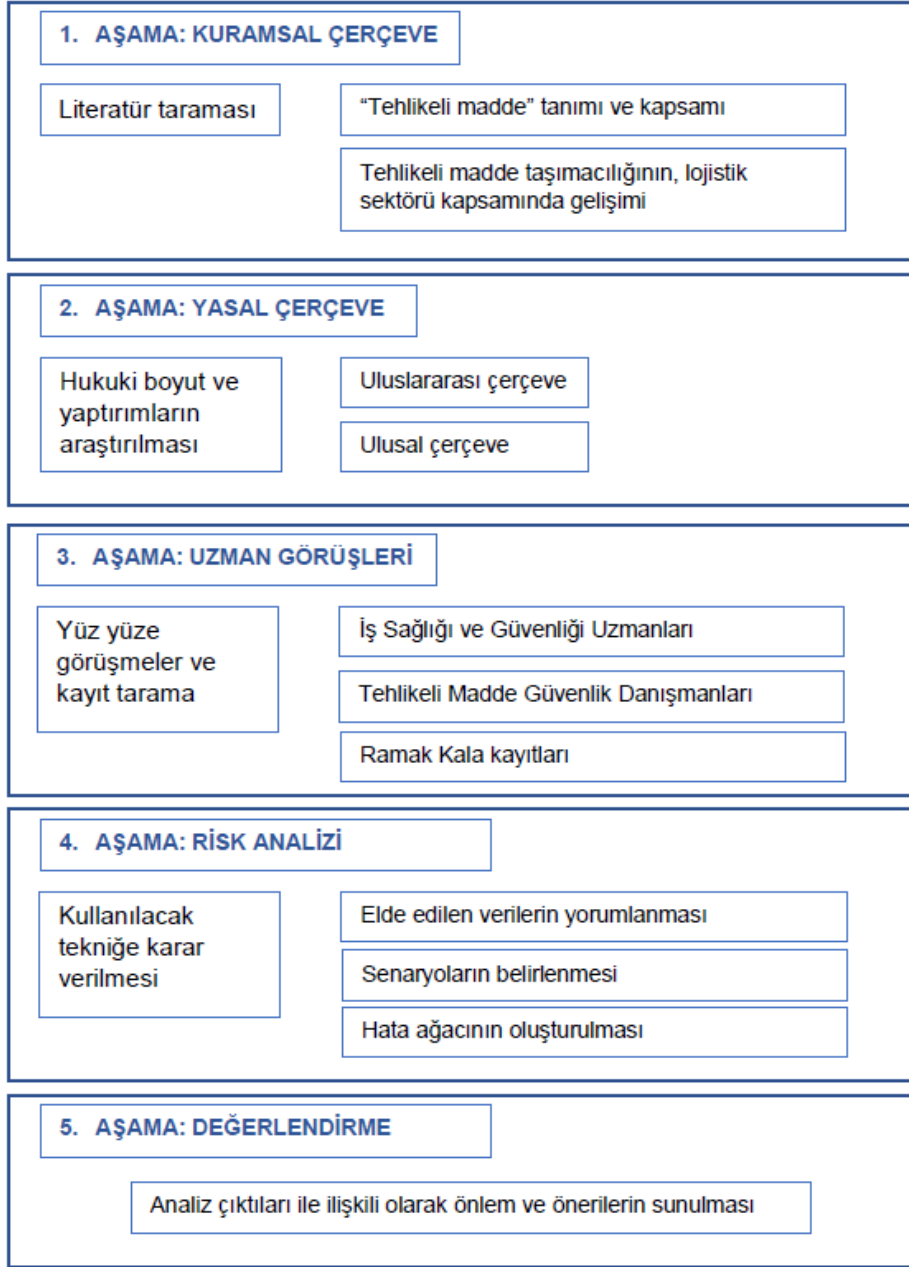
Tablo 3. Hata Ağacı Analizinde kullanılan temel semboller. (Basic symbols used in Fault Tree Analysis)

Sembol	İşaret edilen	İşlev
	Temel olay	Temel olay/hata.
	Olay	Daha temel olaylardan oluşan olay
	VE kapısı	C çıktı olayı, A ve B (tüm girdi) olayları aynı anda meydana geliyorsa görülür
	VEYA kapısı	C çıktı olayı, herhangi bir girdi olayı meydana geliyorsa görülür.
	Transfer sembolü	Ağacın başka bir yerde daha ileri noktaya geliştiğini gösterir.

Tablo 4. Hata Ağacı Analizinin olumlu ve olumsuz yanları (Lee vd., 1985; Deacon vd., 2010). (Pros and cons of Fault Tree Analysis)

Olumlu yanları	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Karmaşık sistemlerde risklerin tespitinde etkilidir. ➤ Çalışma prensibi gereği eş zamanlı olarak tek hata üzerine odaklanmak mümkündür. ➤ Hatalardan kaynaklı olumsuz sonuçlara yönelik genel bakış açısı sunar. ➤ Anlaşılması kolay bir teknik olup, sonuçların tespiti belirli bir deneyim sonrası mümkündür. ➤ Olasılık hesabı yapmada etkili bir tekniktir.
Olumsuz yanları	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Detaylı yapısı nedeniyle zaman alıcıdır. ➤ Gelişmiş sonuçlar üretmesi nedeniyle yüksek doğruluk imajı oluşturabilir, ancak çoğu teknikte olduğu gibi muhtemel hata payları bulunmaktadır. ➤ Mekanik olarak uygulanması mümkün olmayıp, bütün hataların tespitini garantilemez. Farklı uzmanlar tarafından oluşturulan çeşitli ağaç formları olsa da, hatanın kapsamı sabittir. ➤ Gerçekleşmesi için ayrıntılı doküman materyali mevcut olmalıdır.

Çalışmada izlenen süreç Şekil 3'te verilmiştir.

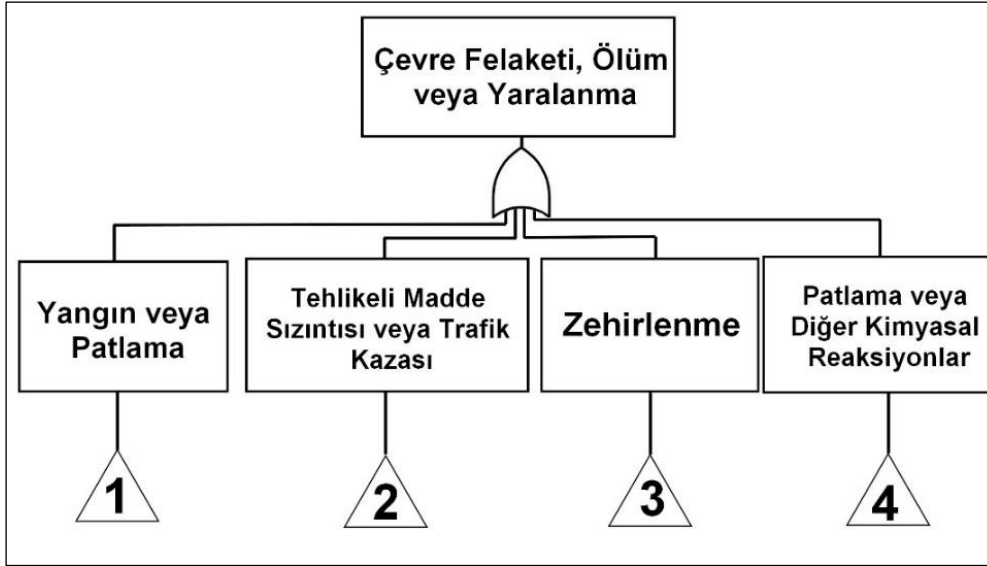


Şekil 3. Çalışmanın akış şeması. (flowchart of the study)

4. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussions)

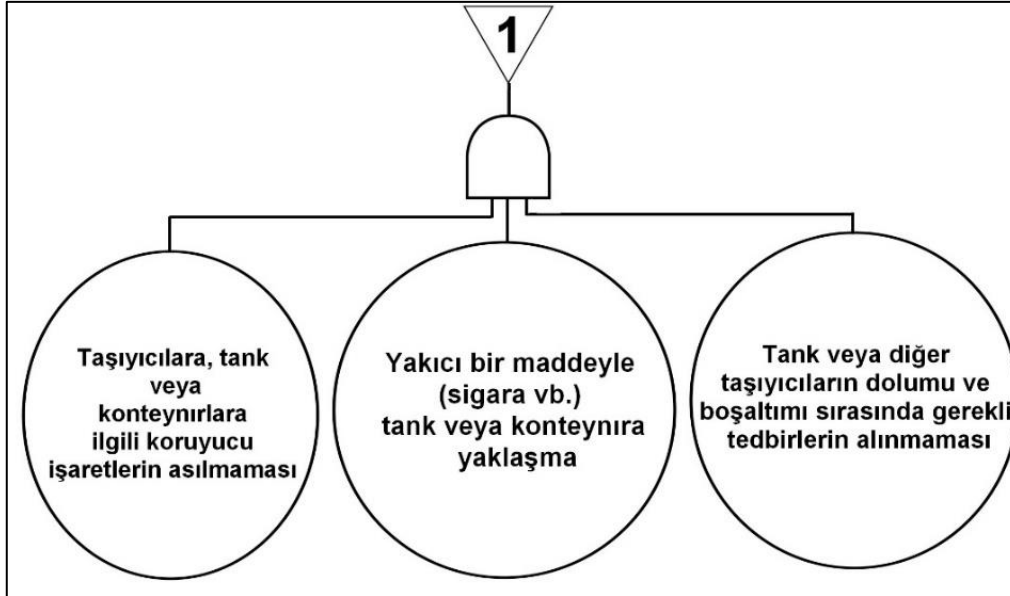
Bu çalışmada, risk değerlendirme süreçlerinde yararlanılan analitik araçlar arasından seçilen Hata Ağacı Analizi kapsamında, tehlikeli maddelerin karayollarında taşınması sürecindeki potansiyel risklerin ve ortaya çıkabilecek sorunların değerlendirilmesine yönelik bir metodoloji izlenmiştir. HAA kapsamında bir temel ağaç ve bu temel ağaç ile ilişkili 4 adet senaryo oluşturulmuştur (Şekil 4). Bu senaryoların oluşturulmasında İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uzmanları ve Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanları (TMGD) deneyimleri ve ramak kala kayıtları göz önüne alınmıştır.

Ramak kala ifadesi, bir işyeri, şantiye vb. alanlarda hasara uğratma potansiyeli olan kazaya yakın durumlar yaşanan, ancak personel, çalışma alanı veya araç-gereçleri üzerinde herhangi bir ciddi kayıp/ hasarın meydana gelmediği bir olayı tanımlar. Ramak kala olaylar ile ilgili tutulan kayıtlar, İSG uzmanlığı ve TMGD çalışmaları kapsamında konu ile ilgili tedbirlerin alınmasında yol gösterici olmaktadır. Ancak, İSG farkındalığının son yıllarda gelişim gösterdiği ülkemizde, bu kayıtların tutulmasında henüz belirli bir sistematik süreç izlenmemektedir. Bu durum ile ilgili yürütülen altyapı çalışmalarına dayanarak, yakın zamanda ülkesel ölçekte olumlu gelişmeler gözleneceği düşünülmektedir.



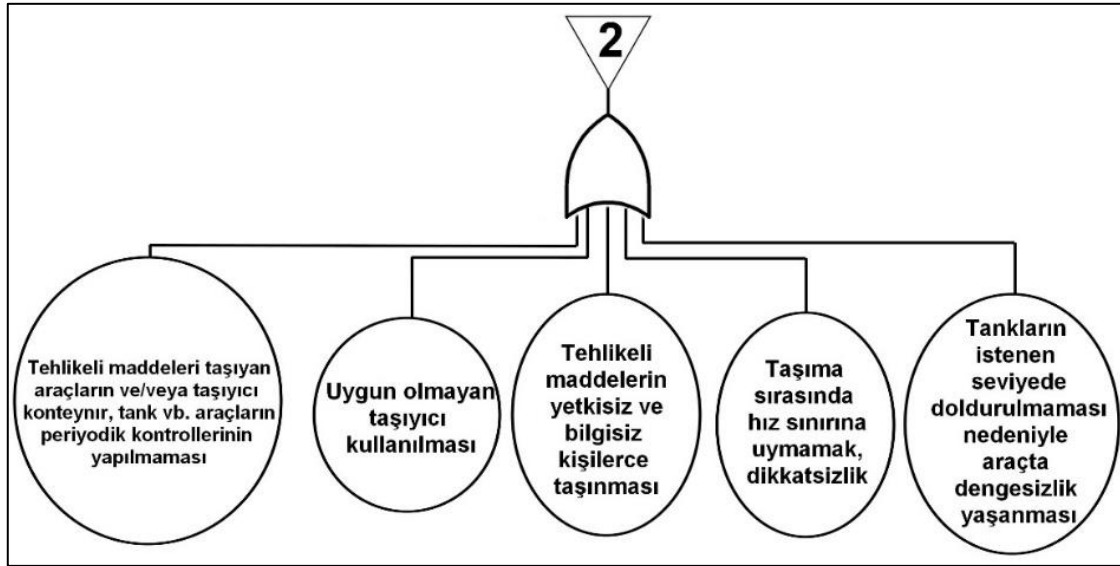
Şekil 4. HAA kapsamında oluşturulan temel ağaç (The fault tree diagram example)

Şekil 4'te, 4 adet alt ağaçtaki temel olaylar sonucunda ortaya çıkması muhtemel üst olayı gösteren temel ağaç verilmiştir. Bu kapsamda, 4 temel olayın veya kapısıyla üst olaya bağlandığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, temel olaylardan herhangi birinin gerçekleşmesi üst olayın meydana gelmesine (çevre felaketi, ölüm veya yaralanmaya) neden olacaktır. Bu 4 temel olayı oluşturan koşullar aşağıda detaylı olarak verilmiştir (Şekil 5; Şekil 6; Şekil 7; Şekil 8).



Şekil 5. 1 numaralı temel olayı gösteren alt ağaç. (Lower-level event 1 of FTA)

Şekil 5'te yangın veya patlamaya yol açabilecek bir olay görülmektedir. Ve kapısıyla bağlı bu olayda, yangın veya patlama olaylarının meydana gelmesi ancak 3 alt olayın birlikte gerçekleşmesi ile mümkündür. Örneğin, yakıcı bir maddeyle tank veya konteynere yaklaşma olayı gerçekleşmediği durumda yangın veya patlama yaşanma riskinin azalması söz konusudur.



Şekil 6. 2 numaralı temel olayı gösteren alt ağaç (Lower-level event 2 of FTA)

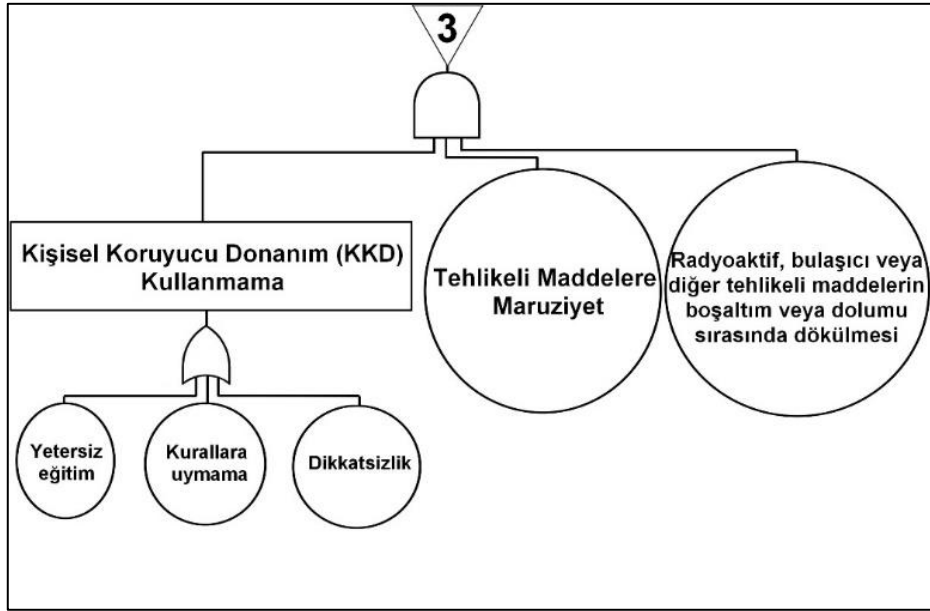
Şekil 6'da görüldüğü gibi, tehlikeli madde sızıntısına veya trafik kazasına neden olabilecek 5 alt olay veya bağlacıyla bağlanmıştır. Bu alt olayların herhangi birinin bağımsız olarak meydana gelmesi temel olayın (tehlikeli madde sızıntısı veya trafik kazası) oluşmasına yol açabilecektir. Bu kapsamda belirli konulara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Tehlikeli madde taşıyan araçlar ve taşıyıcı kaplar belirli özelliklere sahip olmalı ve periyodik olarak kontrol edilmelidir.
- Uygun olmayan taşıyıcılarla tehlikeli maddelerin taşınması (radyoaktif parçacık salınımına yol açan bir malzemenin kurşun olmayan veya çevresel yayılımı önlemede yetersiz kaplarda taşınması) sızıntılara ve kazalara neden olabilecektir. Örneğin, endüstride kullanımı en fazla görülen asit olan sülfürik asitin uygun olmayan tanklarda taşınmasının ardından tankların aşınmasıyla salınımının gerçekleşmesi büyük ölçekte bir çevre faciasına yol açabilir. Sülfürik asit, çevresel felaketlerin en büyüklerinden biri olan asit maden drenajına sebebiyet verebilmektedir.
- Tehlikeli madde taşımacılığı süreçlerinde, konu ile ilgili yeterli bilgi ve deneyimi olmayan kişilerin görev alması, tehlikeli maddelerin sızıntısına veya trafik kazalarına yol açabilmektedir. 08.01.2018 tarihli ve 30295 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Karayolu Taşıma Yönetmeliği hükümleri çerçevesinde, Yönetmelik'te belirtilen faaliyetlerde bulunanlara, öngörülen mesleki yeterlilik eğitimini alan ve/veya yapılacak olan sınavlarda başarılı olanlara veya ilgili mevzuatta belirlenmiş kriterleri sağlayanlara doğrudan mesleki yeterlilik belgesi verilmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığı yapacak sürücülerin Birleşmiş Milletler ülkelerinde geçerli olan SRC 5 ehliyeti başta olmak üzere bazı mesleki yeterliliklere sahip olması gerekmektedir. Yasal çerçevede belirtilen faaliyetlerle ilgili bir mesleki yeterliliğin kazandırılması amacıyla, ilgili mevzuat çerçevesinde verilen eğitim oldukça kapsamlı olup, hangi tünellerden hangi tehlikeli maddelerin geçişi için uygun olduğu, hız sınırı vb. konuları içermektedir.
- ADR hükümleri çerçevesinde, tehlikeli madde taşıyan tankların %20 ile %80 arası oranda doldurulması yasaktır. Belirtilen oranda doldurulma, hız sınırına uyulsa dahi seyir sırasında aracın dengesinin bozulmasına neden olarak kazaya sebebiyet verebilmektedir. Bunun yanı sıra, tankların doluluk oranının %90'ın üzerine çıkması da yasaklanmıştır (Şekil 7).
-



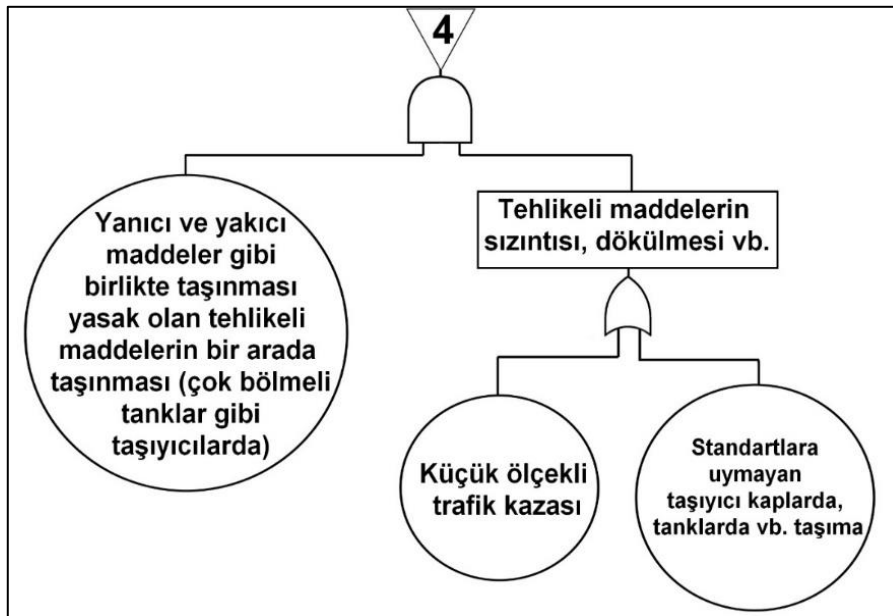
Şekil 7. Tankların uygun doldurulma limitleri (Proper filling limits of tanks)

Zehirlenmeyle sonuçlanabilecek alt olayları gösteren alt ağaç Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. 3 numaralı temel olayı gösteren alt ağaç (Lower-level event 3 of FTA)

Şekil 8’de yer alan senaryoda, Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) kullanmama temel olayı ile sonuçlanan olaylar ayrı bir alt ağaçta gruplandırılmıştır. Veya kapısı ile bağlı alt olayların (yetersiz eğitim, kurallara uymama, dikkatsizlik) herhangi birinin gerçekleşmesi KKD kullanmama ile sonuçlanacaktır. Ardından, KKD kullanmama temel olayı; radyoaktif, bulaşıcı veya diğer tehlikeli maddelerin dolun/boşaltımları sırasında dökülmesi ve bu maddelere maruziyet alt olayları ile aynı anda gerçekleştiğinde (ve kapısı ile bağlı olmaları nedeniyle) 3. Temel olay olan zehirlenme gerçekleşecektir. Bu senaryodaki olumsuz durumların önlenmesi en başta KKDler ile ilgili eğitim verilmesi ve kurallara harfiyen uyulması ile gerçekleşebilecektir. Şekil 9’da patlayıcı maddelerin hızla genişmesi ile oluşan patlamaya ve çevreye zararlı diğer reaksiyonlara sebebiyet veren temel olaylara yol açan alt olaylar görülmektedir.



Şekil 9. 4 numaralı temel olayı gösteren alt ağaç (Lower-level event 4 of FTA)

Birlikte taşınması yasak olan tehlikeli maddelerin taşınması alt olayı ile tehlikeli maddelerin sızıntısı ve dökülmesi olarak belirlenen temel olay ve kapısı ile birbirlerine bağlanmıştır. 2 olayın aynı anda oluşması patlamaya veya çevreye zarar verecek diğer kimyasal reaksiyonlara yol açabilecektir. Tehlikeli maddelerin sızıntısı ve dökülmesi şeklindeki temel olay ise ayrıca 2 alt olayın sonucu olarak görülmektedir. Bu iki alt olaydan biri küçük ölçekli trafik kazası ve diğeri ise standartlara uymayan kaplarda taşımadır. Bu iki alt olayın herhangi birinin gerçekleşmesi (veya kapısı) temel olaya (tehlikeli maddelerin sızıntısı/dökülmesi) sebep olacaktır. Bu olumsuz senaryodan kaçınmanın başlıca yolu, birlikte taşınması yasak olan ve ADR’de belirtilen maddelerin ayrı ayrı taşınmasıdır.

5. Sonuç ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Bu çalışmada, kalitatif risk analizi teknikleri arasında yer alan Hata Ağacı Analizinden yararlanılarak, karayollarında tehlikeli madde taşınma süreçlerindeki potansiyel riskler ve meydana gelebilecek sorunlar değerlendirilmiştir. Hata ağacında yer alan temel risklerin belirlenmesinde, yüz yüze görüşmeler (İSG uzmanları ve TMGD) ve kayıt tarama (ramak kala kayıtları) süreçleri yürütülmüştür. Ramak kala kayıtlarına gerekli önemin verilmemesi ve bu kayıtların çoğu işletmede bulunmaması nedeniyle, ağırlıklı olarak sektör çalışanların deneyimlerine başvurulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda ampirik kapsamlı 4 senaryoyu içeren hata ağacı analizi yürütülerek risklerin önlenmesine yönelik tedbirler belirlenmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen önlemler aşağıda verilmektedir:

- Ülkemizde lojistik yönetimi, aktif politikalar doğrultusunda, sektörde yer alan kurum, kuruluş ve işletmelerin sistematik uygulamaları ile daha etkin bir düzeye getirilmelidir.
- Tehlikeli maddelerin karayollarında taşınması sürecinde, öncelikli olarak konu ile ilgili potansiyel risklere ve ortaya çıkabilecek sorunlara yönelik farkındalık düzeylerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Uygulama ölçeğinde, yasal çerçevenin net olarak takibini teşvik edici yaptırımlar izlenmelidir.
- Tehlikeli madde taşımacılığı sürecinde farklı görevlerde çalışan personele yönelik eğitimlerin düzenlenmesine, farklı düzeylerdeki bu eğitimlerin devamlılığına önem verilmelidir.
- Ramak kala kayıtları kantitatif yapıda olmasına karşılık, kalitatif risk analizi süreçlerinde oldukça önemli bir işleve sahiptir. Bu kayıtların sistematik olarak tutulması, risklere sebebiyet veren tehlikelerin risk oluşumundaki payı vb. sayısal değerlere erişimi sağlayacaktır.
- Sürdürülebilir yaklaşım kapsamında, farklı kanallar aracılığıyla, (i) risklerin ve meydana gelen sorunların halk sağlığı ve çevre üzerinde neden olacağı sorunlara, (ii) doğal kaynak rezervlerinin etkin kullanımına, (iii) sektörel atıkların çeşidine uygun geri dönüşüm süreçlerinin yürütülmesine vb. dikkat çeken bilgilendirmeler yapılmalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- ADR, 2019. Tehlikeli Malların Karayolu İle Taşınmasına İlişkin Avrupa Anlaşması. Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu, Cenevre.
- Akçetin, E., 2013. Tehlikeli Madde Lojistiğinde Risk Yönetimi. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Arslan, Ö., Zorba, Y., Stevak, J., 2018. Fault Tree Analysis of Tanker Accidents during Loading and Unloading Operations at the Tanker Terminals. *Journal of ETA Maritime Science*, / JEMS, 2018; 6(1): 3-16.
- Benner, L., 1978. Five Accident Theories and Their Implications for Research. Paper presented at the Joint International Meeting of the American Association for Automotive Medicine and the International Association for Accident and Traffic Medicine, Ann Arbor MI., 2-3.
- Ceylan, H., Başhelvacı, V.S., 2011. Risk Değerlendirme Tablosu Yöntemi İle Risk Analizi: Bir Uygulama. *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.3, No.2, June 2011.
- Deacon, T., Amyotte, P.R., Khan, F.I., 2010. Human Error Risk Analysis in Offshore Emergencies. *Safety Science*, Volume 48, Issue 6, July 2010, Pages 803-818.
- Dünya Bankası, 2010. Connecting to Compete: Logistica Performance Index and its Indicators. The World Bank Publishing.
- Erdoğan, A., 2015. Hata Ağacı Analizi, Literatür Araştırması ve Orta Ölçekli Bir İşletmede Uygulama. *ÇSGB Çalışma Dünyası Dergisi / Cilt: 3 / Sayı: 1 / Ocak-Nisan 2015 / Sayfa: 106-122*.
- Kim, D.H, Cho, W.I., Seung, J.L., 2020. Fault Tree Analysis as a Quantitative Hazard Analysis with a Novel Method for Estimating the Fault Probability of Microbial Contamination: A Model Food Case Study. *Food Control*, Volume 110, April 2020, 107019.
- Kraidi, L., Shah, R., Matipa, W., Borthwick, F., 2020. Using Stakeholders' Judgement and Fuzzy Logic Theory to Analyze the Risk Influencing Factors in Oil and Gas Pipeline Projects: Case Study in Iraq, Stage II. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* Volume 28, March 2020, 100337.
- KUGM, 2019. Tehlikeli Mal ve Kombine Taşımacılık Düzenleme Genel Müdürlüğü Teşkilat, Görev, Yetki ve Sorumluluk Yönergesi. Karayolu Düzenleme Genel Müdürlüğü, <http://www.kugm.gov.tr>, (Erişim tarihi: 11.11.2019).
- Kuzu, A.C., Akyüz, E., Arslan, O., 2019. Application of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) to Maritime Industry: A Risk Analysing of Ship Mooring Operation. *Ocean Engineering* Volume 179, 1 May 2019, Pages 128-134.
- Ringdahl, L.H., 2001. "Safety Analysis Principles and Practice in Occupational Safety", Second Edition, Tailor and Francis, London Newyork 2001.
- Lee, W.S., Grosh, D.L., Tillman, F.A., Lie, C.H., 1985. Fault Tree Analysis, Methods, and Applications – A Review. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. R-34, no. 3, pp. 121-123.
- Lojistik Hizmetlerinin Geliştirilmesi Özel İhtisas Komisyon Raporu, 2014. Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018).
- Menteş, A. & Helvacioğlu, İ., 2010. Çok Noktadan Bağlı Tanker-Şamandıra Bağlama Sistemlerinde Hata Ağacı Tabanlı Risk Analizi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, Sayı: 182, Şubat 2010.

- Özdikmen, T., 2016. Karayolu İle Tehlikeli Madde Taşımacılığı ve Nakliye Acil Durum Yönetimi. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Özer, B.B., 2011. Türkiye'de Karayolu İLE Tehlikeli Madde Taşımacılığının Avrupa Anlaşması (ADR)'na Geçiş Kapsamında Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Özkılıç, Ö., 2005. "İş Sağlığı ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri Ve Risk Değerlendirme Metodolojileri", Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu, 27-140.
- Resmi Gazete, 2019. Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik. 24.04.2019 tarihli ve 30754 sayılı Resmi Gazete.
- Shi, J., Chang, Y., Khan, F., Zhu, Y., Chen, G., 2020. Methodological Improvements in the Risk Analysis of an Urban Hydrogen Fueling Station. Journal of Cleaner Production Volume 257, 1 June 2020, 120545.
- Şenel, B., Şenel, M., 2013. Risk Analizi: Türkiye'de Gerçekleşen Trafik Kazaları Üzerine Hata Ağacı Analizi Uygulaması. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, Cilt/Vol.: 13- Sayı/No: 3 (65-84).
- TGD Bulletin, 2018. Dangerous Goods Safety Marks. Transportation of Dangerous Goods, Transport Canada.
- WHSQ, 2012. Managing the Risks from Dangerous Goods. Queensland Government, Workplace Health and Safety Queensland.



NİKEL (II) İYONLARININ ATIK ÇAY'A BİYOSORPSİYONU: DENGE, KİNETİK VE TERMODİNAMİK ÇALIŞMALARI

Mustafa ÖZTÜRK^{1*}, Sayiter YILDIZ², Şükrü ASLAN³

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Sivas, Türkiye
^{2,3} Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye.

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Biyosorpsiyon, Nikel, Atık Çay, Denge, Kinetik.</i>	<p>Bu çalışmada atık çay (AÇ) kullanılarak Ni(II) iyonunun biyosorpsiyonu araştırılmıştır. Ni(II) giderme veriminin (E) ve biyosorpsiyon kapasitesinin (q_e) belirlenebilmesi amacıyla temas süresi, sıcaklık, pH, başlangıç Ni(II) derişimi ve AÇ dozu gibi çeşitli deney koşulları altında kesikli deneyler yapılmıştır. Biyosorpsiyonun ilk dakikalarda çok hızlı gerçekleştiği ve ilk 30 dk.'da dengeye ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca pH'nın yükselmesi ile biyosorpsiyon veriminin arttığı ve pH 5–7 arasında en yüksek değerlerde olduğu ve çözelti sıcaklığının artmasıyla q_e'nin de yükseldiği belirlenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak hesaplanan R^2, q_{den} ve q_{hes} değerlerine göre adsorpsiyon eşitliğinin en iyi, Langmuir ve Temkin izoterm modelleri ile tanımlanmaktadır. Deney verileri Ni(II) iyonlarının AÇ'ye biyosorpsiyonunun ekzotermik bir reaksiyon olduğunu göstermektedir. Kinetik modeller kıyaslandığında, biyosorpsiyonun en iyi yalancı II. derece kinetik model tarafından tanımlandığı belirlenmiştir. Termodinamik parametreler adsorpsiyon işleminin AÇ tarafından Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca farklı çözücüler ile yapılan desorpsiyon çalışmasında AÇ'nin sorbent olarak yeniden kullanılabilirliği belirlenmiştir.</p>

BIOSORPTION OF NICKEL (II) IONS ONTO TEA WASTE: EQUILIBRIUM, KINETIC AND THERMODYNAMIC STUDIES

Keywords	Abstract
<i>Biosorption, Nickel, Tea Waste, Equilibrium, Kinetic.</i>	<p>In this study, the biosorption of Ni (II) ions onto the tea waste (TW) was investigated. The batch experiments were carried out to determine the removal efficiency (E) and biosorption capacity (q_e) of Ni (II) under various experimental conditions such as contact time, temperature, pH, initial Ni (II) concentration and TW dose. It was determined that the biosorption was very fast in the first minutes and the equilibrium was reached in the first 30 minutes. The biosorption efficiency increased with the increase of pH and the highest sorption of Ni(II) onto the TW was observed at the initial pH values between 5–7. The q_e value increased with the increase of solution temperature. According to the R^2 value, q_{exp} and q_{cal}, the adsorption equilibrium was well described by the Langmuir and Freundlich isotherm models. Experimental data show that the biosorption of Ni(II) ions onto the TW is an exothermic reaction. By the comparison of kinetic models, results demonstrated that the system was best described by the pseudo second-order kinetic model. Thermodynamic parameters show that the adsorption process can be used to remove Ni (II) ions by the TW. It was also revealed in the desorption studies conducted with different solvents that the TW could be reuse after desorption.</p>

Alıntı / Cite

Öztürk, M., Yıldız, S., Aslan, Ş., (2020). Nikel (II) İyonlarının Atık Çay'a Biyosorpsiyonu: Denge, Kinetik ve Termodinamik Çalışmaları, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 985-998.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Öztürk, 0000-0002-8825-6283
S. Yıldız, 0000-0002-3382-2487
Ş. Aslan, 0000-0001-8735-8029

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.05.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: mozturk@cumhuriyet.edu.tr, +90-346-219-1010-2364

1. Giriş (Introduction)

Ağır metaller, yer kabuğunda doğal olarak bulunmakla beraber, tüm canlılar için ciddi sorunlara neden olabilmektedir (Fu ve Wang, 2011; Al-Samman, 2015). Başlıca arsenik, çinko, nikel, bakır, civa, kurşun, krom, kobalt gibi ağır metal/loid iyonları son yıllarda dünyanın çeşitli yerlerinde özellikle su kirliliği açısından önemli sorunlar oluşturmaktadır. Birçok kirletici arasında, metal iyonları kirliliği, metallerin parçalanamayan doğası nedeniyle önemlidir (Siddiqui vd., 2020). Metal iyonları arasında ise nikel kötü şöhretli bir su kirleticisi olarak kabul edilir ve paslanmaz çelik, metalik alaşımlar, süper alaşımlar, demir dışı metaller, porselen, piller, madeni paralar, bakır sülfat, elektrokaplama, emaye, boya, buharlı elektrik santralleri gibi çeşitli endüstriyel atıksularda bulunmaktadır (Villaescusa vd., 2004; Padmavathy vd., 2003; Hasar, 2003; Aksu, 2002). Atıksular, uygun yöntemler ile arıtılmazsa Ni(II) iyonları, su ortamlarına karışmaktadır (Siddiqui vd., 2020).

İnsanlar yüksek derişimlerde Ni(II)'ye maruz kaldığında, oksidatif enzim aktivitesinin inhibisyonu, baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı ve kusma, göğüs ağrısı, göğüste sıkışma, kuru öksürük ve nefes darlığı gibi, uzun süreli maruziyette ise akciğer sertleşmesi, akciğer, burun ve kemik kanseri, böbrek ödemi, cilt dermatiti gibi sağlık problemleri ortaya çıkmaktadır (Siddiqui vd., 2020; Meena vd., 2005). Bu nedenle, alıcı ortama deşarj edilmeden önce Ni(II)'nin sudan giderilmesi gerekmektedir. Yapılan literatür taramasında Ni(II)'nin sudan giderilmesinde iyon değişimi ve çöktürme (Papadopoulos vd., 2004; Keränen vd., 2015), çöktürme (Shaidan vd., 2012), ters ozmoz (Ipek, 2005), koagülasyon ve flokülasyon (Heredia ve Martín 2009), foto-katalitik giderme (Shirzad Siboni vd., 2011; Ali vd., 2018), membran filtrasyonları (Murthy ve Chaudhari 2008) ve elektrokimyasal yöntemler (Dermentzis vd., 2011; Chen vd., 2013) uygulanmaktadır. Ancak uygulanan arıtım yöntemlerinin düşük verimlilik, yüksek işletim maliyeti, hassas çalışma koşulları ve ikincil kirleticilerin üretimi gibi sınırlamaları, ilave arıtım işlemlerini gerektirmektedir (Siddiqui vd., 2020). Sadeliği, uygun maliyeti ve doğası nedeniyle adsorpsiyon süreci, atıksuların arıtılmasında oldukça etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Vakili vd., 2020; Saini vd., 2020; Rizwan vd., 2020; Panda vd., 2007; Moawad vd., 2020). Özellikle doğada bol miktarda bulunan malzemeler veya endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan bazı atık malzemeler, adsorbent olarak daha ucuz ve etkili oldukları için tercih edilmektedir (Panneerselvam vd., 2009).

Genel olarak, az işlem gerektiren, bol bulunan veya başka bir endüstriden elde edilen yan ürün veya atık malzeme "düşük maliyetli" adsorbent olarak tanımlanmaktadır (Tahir ve Rauf, 2003). Literatürde yapılmış olan deneylerde turba yosunu (Ho vd., 1995), hindistan cevizi kabuğu, greyfurt kabuğu (Torab-Mostaedi vd., 2013), şeker endüstrisi atığı (Rao vd., 2002), fındık kabuğu (Tunç Dede, 2016) fıstık kabuğu (Yıldız, 2018), kaju fıstığı kabuğu (Kumar vd., 2011), pirinç samanı (Tran vd., 2017), şeker kamışı sapı kalıntısı (Alomá vd., 2012), kitin (Benguella ve Benaissa 2002), talaş (Rafatullah vd., 2009), yeşil algler (Malkoc ve Nuhoglu, 2003), yerel algler (Rizwan vd., 2020), su yosunu (Bermúdez vd., 2011), maya (Padmavathy vd., 2003; Cojocararu vd., 2009), uçucu kül (Serencam ve Uçurum, M, 2019; Lin ve Chang, 2001), kemik kömürü (Cheung vd., 2001), linyit (Eligwe vd., 1999), zeolit (Panneerselvam vd., 2009), odun (Ćurković vd., 2009) ve atık çay (Tran vd., 2017; Malkoc ve Nuhoglu, 2006b; Malkoc ve Nuhoglu, 2006a; Malkoc ve Nuhoglu, 2005; Cay vd., 2004; Aslan vd., 2016) biyolojik hücreler (Özdemir vd., 2009; Congeevaram vd., 2007; Chen vd., 2008; Aslan vd., 2018; Alzahrani vd., 2017; Aksu ve Donmez, 2006; Akar vd., 2013; Ahmady-Asbchin ve Bahrami, 2011) gibi farklı düşük maliyetli malzemeler, ağır metallerin adsorpsiyonunda kullanılmıştır.

Atık çay (AÇ), ağır metal iyonlarının su ortamından uzaklaştırılmasında adsorban olarak kullanılabilir (Weng vd., 2014; Wan vd., 2014). Çay (Theaceae familyasına ait *Camellia sinensis*), ülkemizde Doğu Karadeniz bölgesinde yaygın olarak yetiştirilen bir bitkidir (Malkoc ve Nuhoglu, 2005). Bitki yapraklarının sıcak su ile haşlanarak tüketilen çay içeceği, Türkiye'nin her yöresinde oldukça popülerdir ve dünyada yılda 5 milyon ton civarında çay tüketilmektedir (Öztürk vd., 2015).

Ni(II)'nin çaya biyosorpsiyonu ile ilgili sınırlı sayıda ki deneysel çalışmada genellikle izoterm ve kinetik çalışılmıştır (Yang vd., 2016; Panneerselvam vd., 2011; Malkoc ve Nuhoglu, 2005; Ahluwalia ve Goyal, 2005). Bu çalışmada farklı izoterm ve kinetik modellerinin yanısıra desorpsiyon çalışması da yapılmıştır. Atık çayın (AÇ) Ni(II) iyonlarını sorplama kapasitesinin belirlenmesi, AÇ'nin endüstriyel atıksuların arıtımında ön arıtma olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada, ülkemizde oldukça yüksek miktarda tüketilen AÇ'nin, Ni(II) biyosorpsiyonunda sorbent olarak kullanılabilme potansiyeli araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında, Ni(II) iyonlarını içeren sentetik atıksuyun arıtımında AÇ, adsorbent olarak kullanılmıştır. Biyosorpsiyon çalışmasında denge süresi belirlenerek, farklı sıcaklık ve pH'larda, sorbent miktarı ve Ni(II) derişiminlerinin biyosorpsiyona etkisi incelenmiştir. Ayrıca farklı pH ve sıcaklarda biyosorpsiyon izotermi, kinetik ve termodinamik çalışmaları yapılmıştır. AÇ'nin Ni(II) biyosorpsiyonunda tekrar kullanılabilirliği desorpsiyon deneyleri ile araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1 Biyosorbentin Hazırlanması (Preparation of the Biosorbent)

İçecek olarak tüketilmesi ile toplanan kalıntı AÇ, kirleticilerden temizlemek için çeşme suyu ve saf su ile yıkanmıştır. Temizlenen AÇ, yaklaşık 60 °C'de, 24 saat süre ile etüvde kurutulmuştur. Kuru katı biyosorbent, havan ile öğütülmüş, 250µm elekten geçirilmiş ve elde edilen toz AÇ, adsorpsiyon deneylerinde kullanılmıştır. Genel olarak çay atıklarının kimyasal içeriği; %49,6 C, %5,1 H, %42,6 O ve %2,7 N olarak, nem ve kül içeriği ise sırasıyla %6,5 ve 3,4 olarak verilmektedir (Demirbas, 1999).

2.2 Sentetik Atıksuyun Hazırlanması (Preparation of Synthetic Wastewater)

Sentetik atıksu çözeltileri, analitik saflıkta NiCl₂.6H₂O (Merck) saf su içerisinde çözdürülerek 1000 mg/L derişimi olacak şekilde hazırlanmıştır. Çözeltiler, deneyler için gerekli derişimlerde seyreltilmiştir.

2.3 Kesikli Biyosorpsiyon Deneyleri (Batch Biosorption Experiments)

Ni(II)'nin, AÇ'ye biyosorpsiyonunda etkin pH, sıcaklık ve adsorbent dozu, 100 mL Ni(II) çözelti hacminde, 0,1 g AÇ ile 250 mL cam kapaklı erlenmeyerlerde belirlenmiştir. Biyosorpsiyon çalışmaları 125 dev/dk. karıştırma hızında sürdürülmüştür (Aslan vd., 2018). Deneysel çalışmalarda uygulanacak başlangıç Ni(II) derişimi 25 mg/L, ön deneysel çalışmalarda tespit edilmiştir. Ni(II) biyosorpsiyonunda, denge süresinin belirlenmesinde sıcaklık 35°C'de sabit tutulmuş ve karıştırma süresi 240 dk. alınmıştır. Diğer deneyler, tespit edilen denge süresinde ve pH 5,0 ± 0,1'de gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, sıcaklık kontrollü çalkalayıcı (Gerhardt) ile yürütülmüştür ve çözelti pH'sı 0,01 N H₂SO₄ ve/veya NaOH çözeltileri ile ayarlanmıştır.

2.4 Desorpsiyon ve Yeniden Kullanım Deneyleri (Desorption and Reuse Experiments)

Ni(II) iyonları ile yüklü AÇ'nin desorpsiyonu, 0,1 M H₂SO₄, 0,1 M HCl çözeltileri ve saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 1,0 g AÇ ve 250 mg/L Ni(II) derişiminde, 100 mL çözelti hacminde sorpsiyon deneyleri yapılmıştır. Sorpsiyon deneylerinin tamamlanmasından sonra çözelti, 0,45 µm membran filtreden süzümüştür. Süzüntü Ni(II) ölçümleri yapılarak AÇ tarafından tutulan Ni(II) miktarı tespit edilmiştir. Sorpsiyon deneylerinde kullanılan Ni(II) yüklü AÇ, etüvde kurutulmuş ve farklı yıkama çözeltileri (100 mL; 0,1 M H₂SO₄, 0,1 M HCl ve saf su) ile Ni(II), AÇ'den desorbe edilmiştir. Desorpsiyon çalışması, 100 mL yıkama çözeltisinde 30 dakika karıştırma süresinde gerçekleştirilmiştir. Karıştırma tamamlandıktan sonra erlen içeriği süzülerek, süzükte Ni(II) miktarı ölçülmüş ve desorpsiyon verimi hesaplanmıştır. Ayrıca süzülerek elde edilen AÇ, tekrar saf su ile yıkama ve kurutma sonrası sorpsiyonda kullanılmıştır. Desorpsiyon ile AÇ'nin Ni(II) adsorpsiyon verim değişimi hesaplanmıştır.

2.5 Ölçüm Yöntemi (Measurement Method)

Başlangıç çözeltisinden ve deney sonrası alınan örneklerde Ni(II) ölçümleri yapılmıştır. Analizler, 10 dk., 4000 dev/dk.'da (NF800, NUVE) santrifüj edilmesi ile elde edilen üst sıvıdan alınan numunelerde gerçekleştirilmiştir. Ni(II) derişimleri, spektroquant kit ile (Merck 14767), Merck PHARO100 spektrofotometrede ölçülmüştür. Örnek pH ölçümleri, HANNA marka pH metre ile yapılmıştır. Biyosorpsiyon deneyleri en az üç tekerrürlü olarak yapılmış, ortalama değerler hesaplanmış ve grafikler oluşturulmuştur (standart sapma ≤5%). Her deney setinde en az bir adet şahit örnek kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

AÇ'ye Ni(II) iyonlarının biyosorpsiyon verimi (% E) ve kapasitesi (q_e) Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

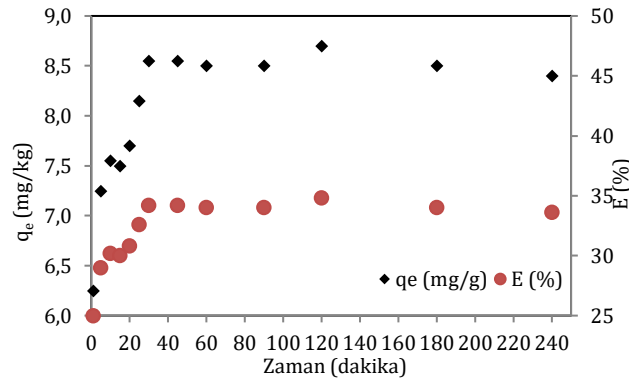
$$E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e (mg/g) = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (2)$$

Burada; C₀ başlangıç Ni(II) çözelti derişimi (mg/L), C_e biyosorpsiyon sonrası Ni(II) çözelti derişimi (mg/L), q_e biyosorplanan Ni(II) miktarı (mg Ni(II)/g AÇ), V çözelti hacmi (L) ve m biyosorbent miktarını (g) vermektedir.

3.1 Temas Süresi Etkisi (Effect of Contact Time)

Temas süresi ve başlangıç derişimi, adsorbat türlerinin sulu çözeltiden uzaklaştırılmasında önemli etkiye sahip iki parametredir (Panneerselvam vd., 2011). Şekil 1'de görüldüğü gibi Ni(II)'nin, AÇ'ye biyosorpsiyonu ilk 5 dk.'da hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Giderme verimi 1. ve 5. dk.'da sırasıyla %25 ve %29 olarak hesaplanmıştır. 5. dk.'dan itibaren temas süresi arttıkça, giderme verim hızı düşmüş ve 30. dk.'da %34,2 olarak tespit edilmiştir. Bu sürede, q_e 8,55 mg Ni(II)/g AÇ olarak hesaplanmıştır. 45 dk.'da giderme verimi değişmeyerek %34,2 olarak ölçülmüştür. Karıştırma süresi arttırıldığında Ni(II) giderme verimi ve q_e değeri sabit kaldığından etkin temas süresi 30 dk. olarak kabul edilmiştir. Bu durum AÇ'in sorpsiyon yüzeylerinin açık olduğunu ve yüksek çözelti derişimi nedeniyle biyosorpsiyon hızının da yüksek olduğunu göstermektedir. Aktif sorpsiyon yüzeylerinin Ni(II) metali ile kaplanması, biyosorpsiyon hızının düşmesine sebep olmaktadır. Ni(II)'nin AÇ'ye biyosorpsiyon kapasitesinin incelendiğibenzer çalışmalarda, farklı temas süreleri elde edilmiştir. Bazı çalışmaların bir kıamında etkin temas süresi 100–120 dk. aralığında (Thakur ve Parmar, 2013; Shah vd., 2015; Panneerselvam vd., 2011) belirlenirken, farklı çalışmalarda ise 20–30 dk. aralığında da yüksek giderim hızı tespit edilmiştir (Malkoc ve Nuhoglu, 2005; Ahluwalia ve Goyal, 2005). Bu çalışmada denge süresi 30 dk.olarak belirlenmiştir.

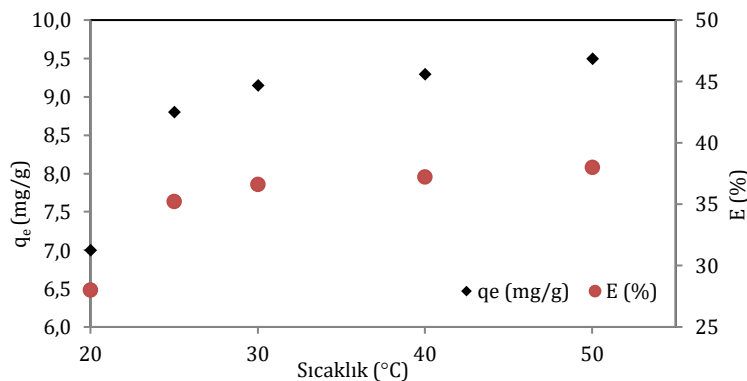


Şekil 1. Temas süresinin Ni(II) giderme verimine ve q_e 'ye etkisi (Effect of contact time on Ni(II) removal efficiency and q_e)

3.2 Sıcaklık Etkisi (Effect of Temperature)

Sıcaklık, metal katyonunun hareketliliğini arttırdığından önemli bir faktördür (Wan vd., 2014; Malkoc ve Nuhoglu, 2005). Ayrıca sorbentlerin yüksek denge kapasitesinden dolayı, sıcaklığın yükselmesi sorbent matrisini değiştirebilmekte ve daha fazla sorpsiyon bölgelerine yol açabileceğinden, biyosorpsiyon kapasitesinin artmasına neden olmaktadır (Liu vd., 2009). Bununla beraber, sıcaklık artışının, AÇ'nin iç yapısında, metal katyonunun daha fazla nüfuz etmesini sağlayan bir genişleme etkisi oluşturabileceği bildirilmiştir (Aksu, 2002).

Sıcaklığın biyosorpsiyona etkisi, 20-50 °C aralığında 5 farklı sıcaklıkta incelenmiştir. AÇ'nin Ni(II) biyosorpsiyon kapasitesinin; 20–30 °C aralığında sıcaklık artışına bağlı olarak hızla arttığı, 30–50 °C aralığında ise sıcaklık artışına bağlı olarak düşük de olsa artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2). En düşük biyosorpsiyon verimi (%28) en düşük çalışma sıcaklığı olan 20 °C'de, en yüksek verim ise (%38) 50 °C'de görülmüştür. q_e değeri ise verim ile paralellik göstererek en düşük 20 °C'de 7 mg Ni(II)/g AÇ, olarak hesaplanırken en yüksek, 50 °C'de 9,5 mg Ni(II)/g AÇ olarak bulunmuştur. Genel olarak sıcaklık artışının AÇ'nin biyosorpsiyon kapasitesini artırması, Ni(II) adsorpsiyonunun endotermik bir süreç olduğunu göstermektedir (Aslan vd., 2018). Adsorpsiyon verimi ve kapasitesinin artan sıcaklık ile yükselmesi AÇ'ye Ni(II)'nin adsorpsiyonunun sadece fiziksel olmadığını aynı zamanda kimyasal sorpsiyon olduğunu göstermektedir (Aksu, 2002).

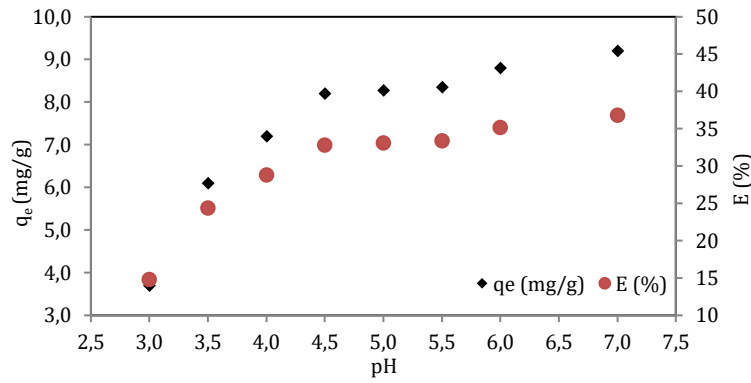


Şekil 2. Sıcaklık değişiminin Ni(II) biyosorpsiyonuna etkisi (Effect of temperature change on Ni(II) biosorption)

3.3 Başlangıç pH Etkisi (Effect of Initial pH)

Çözeltinin pH'sı biyosorpsiyon hızını ve derecesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Shah vd., 2015; Kratochvil ve Volesky, 1998). pH, adsorbentin özelliğini ve aynı zamanda ağır metal iyonlarının tür dağılımını etkileyebilmektedir (Yang vd., 2016). pH < 3,0 olması durumunda, H⁺ iyonları, adsorbent yüzeyi için Ni(II) iyonlarıyla rekabet ederek, sorbentin bağlanma bölgelerine ulaşmasını engellemektedir. Biyosorpsiyon kapasitesine pH etkisi, pH 3,0-7,0 aralığında incelenmiştir.

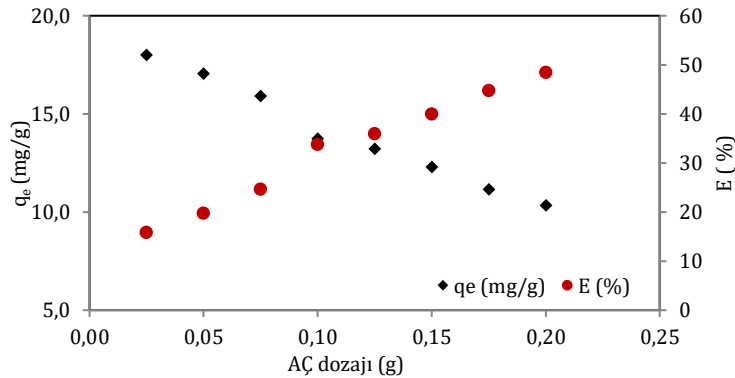
pH'nın yükseltilmesi ile AÇ'nin biyosorpsiyon kapasitesi artış göstermektedir (Şekil 3). Biyosorpsiyon verimi, pH 3,0'da %14,8 iken, pH'nın 7,0'a yükseltilmesi ile %36,8'e artmıştır. Ayrıca pH 3,0'te, q_e 3,7 mg Ni(II)/g AÇ, pH 7,0'de ise 9,2 mg Ni(II)/g AÇ olarak hesaplanmıştır. Metallerin adsorpsiyonu farklı pH değerlerinde optimize edilmektedir (Wahi vd., 2010). Ayrıca kullanılan biyokütle tipi de metal adsorpsiyonunda optimum pH'ı etkilemektedir (Jamali vd., 2009). Ni(II)'nin çay bitkisine biyosorpsiyonuyla ilgili yapılan çalışmalarda pH 5-7 değerleri en uygun koşullar olarak belirtilmektedir (Yang vd., 2016; Shah vd., 2015; Panneerselvam vd., 2009; Malkoc ve Nuhoglu, 2005; Aslan vd., 2016).



Şekil 3. pH'nın Ni(II) biyosorpsiyonuna etkisi (Effect of pH on Ni(II) biosorption)

3.4 Sorbent Dozajı Etkisi (Effect of Sorbent Dosage)

Sorbent dozu, sorpsiyon sürecini etkileyen önemli bir faktördür. Genel olarak, sorbent dozu arttıkça, metal iyonlarının bağlanması için sorpsiyon bölgelerinin artması nedeniyle giderim verimi artmaktadır (Shah vd., 2015; Panneerselvam vd., 2011). Deneysel, sabit sıcaklık (35 °C) ve Ni(II) derişiminde, farklı AÇ dozlarında (0,025-0,20 g AÇ) sorbent dozunun biyosorpsiyona etkisi araştırılmıştır. AÇ miktarının artması ile çözeltiden giderilen Ni(II) miktarı da artmaktadır (Şekil 4). En düşük sorbent derişiminde (0,025 g AÇ) giderim verimi %15,80 olarak elde edilirken, en yüksek derişim olan 0,20 g AÇ için ise verim % 48,40'a yükselmiştir. Biyosorpsiyon sırasında AÇ'nin aktif bağlanma yüzeylerinin doygunluğa ulaşmamasından dolayı, AÇ miktarı arttığında, biyosorpsiyon kapasitesi azalmaktadır (Jianlong vd., 2000). Sorbent dozunun çözeltide artırılması, giderilmesi istenen kirleticinin adsorpsiyonunda daha fazla aktif yüzey alanı sağlamak ve kirleticinin, adsorbentin aktif sorpsiyon bölgelerine aktarımını (penetrasyon) kolaylaştırmaktadır (Kovacevic vd., 2000).



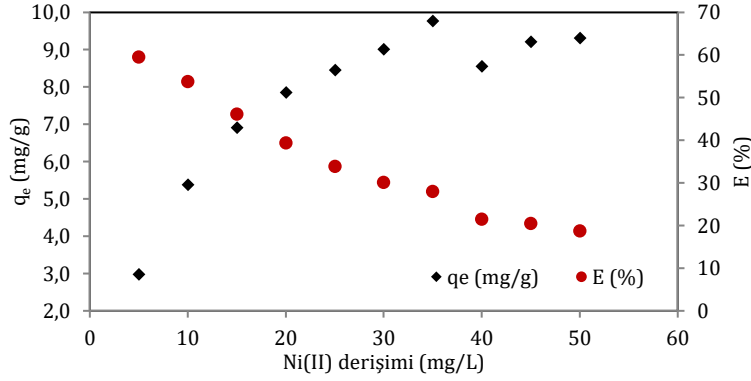
Şekil 4. AÇ dozajının Ni(II) biyosorpsiyonuna etkisi (Effect of TW dosage on Ni(II) biosorption)

3.5 Başlangıç Ni(II) Derişiminin Etkisi (Effect of Initial Ni(II) Concentration)

Çözeltideki metal derişimindeki artış, metal iyonları ile adsorbentin etkili adsorpsiyon bölgeleri arasındaki temas olasılığını artırdığından, adsorpsiyon kapasitesi artmaktadır (Yang vd., 2016). Literatürde ayrıca ağır metallerin

yüzde olarak giderilmelerinin başlangıç metal iyonları derişimine bağı olduğu ve derişimindeki artışla birlikte giderimin azaldığı bildirilmektedir (Thakur ve Parmar, 2013).

Ni(II) derişiminin AÇ'ye biyosorpsiyonuna etkisi, optimum koşullar olarak belirlenen sıcaklık (30 °C) ve pH (5)'da, 5-50 mg/L Ni(II) derişim aralığında incelenmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi Ni(II) derişiminin artması ile birlikte biyosorpsiyon verimi azalırken q_e değeri, artmıştır. 5 mg/L Ni(II) derişiminde verim %59,40 ve q_e 2,97 mg/g iken, 50 mg/L derişimde giderim verimi %18,60 ve q_e 9,30 mg/g olarak tespit edilmiştir. Düşük iyon derişimlerinde, AÇ yüzey aktif bölgelerinin çözeltideki mevcut toplam iyon derişimine oranı yüksek olduğunda, tüm metal iyonları adsorbent ile etkileşim içindedir ve sudan uzaklaştırılabilmektedir. Ancak, adsorbentin birim kütlesine adsorplanan metal miktarı, yüksek derişimlerde artmaktadır (Amarasinghe ve Williams, 2007). Çözelti içerisinde metal iyon derişimi arttığında, adsorbentin birim yüzey alanında daha fazla metal iyonu bulunduğundan yüzey adsorpsiyonu artmaktadır (Bermúdez vd., 2011).



Şekil 5. Ni(II) derişiminin biyosorpsiyona etkisi (Effect of Ni(II) concentration on biosorption)

3.6 Denge Çalışmaları (Equilibrium Studies)

Kirleticilerin katı yüzeye adsorpsiyonu yoluyla giderilmesi için denge çalışmalarının tanımlanmasında çeşitli matematiksel modeller kullanılmaktadır (Panneerselvam vd., 2011). Farklı adsorpsiyon izoterm modelleri, adsorpsiyon sürecinde giderim kapasitesinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Sahu vd., 2020). Bu çalışmada Freundlich, Langmuir, Temkin ve Dubinin-Radushkevich (D-R) izotermelerini içeren denge modelleri araştırılmış ve adsorpsiyon sürecini açıklamak için deneysel veriler incelenmiştir. Çözelti ve sorbent arasında Ni(II) dağılımını değerlendirmek amacıyla Tablo 1'de verilen izoterm eşitlikleri kullanılmıştır.

Tablo 1. İzoterm model eşitlikleri (Isotherm model equations)

İzoterm modelleri	Eşitlikler	Grafik eksenleri	Kaynak
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \times K_L} + \frac{1}{q_m} C_e$ $R_L = \frac{1}{(1 + K_L \times C_0)}$	$x - \text{ekseni} \rightarrow \frac{C_e}{q_e}$ $y - \text{ekseni} \rightarrow C_e$	Moreira vd., 2019
Freundlich	$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \times \log C_e$	$x - \text{ekseni} \rightarrow \log q_e$ $y - \text{ekseni} \rightarrow \log C_e$	
Temkin	$q_e = \frac{R \times T}{b_T} \times \ln(A_T \times C_e)$	$x - \text{ekseni} \rightarrow q_e$ $y - \text{ekseni} \rightarrow \ln C_e$	Ho vd., 2002
D-R	$\ln q_e = \ln q_{max} - \beta \times \varepsilon$ $\varepsilon = R \times T \times \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right)$ $E = \frac{1}{\sqrt{2 \times \beta}}$	$x - \text{ekseni} \rightarrow \ln q_e$ $y - \text{ekseni} \rightarrow \varepsilon^2$	Lin ve Juang, 2002

Tablo 1'de sunulan eşitlikle; β , ortalama serbest enerji (mol^2/j^2), E biyosorpsiyon enerjisi, K_L Langmuir sabiti (L/mg), K_F Freundlich sabiti (L/mg), $1/n$ adsorpsiyon yoğunluğu, q_{max} maksimum biyosorpsiyon kapasitesi (mg/g), b_T ve A_T , Temkin parametresi (L/mg) olarak verilmiştir. Modellerde, ideal gaz sabiti R 8,314 joule/mol.K ve sıcaklık (T) Kelvin (K) olarak alınmıştır.

Adsorbent ve Ni(II) derişimlerine göre hesaplanan izoterm parametreleri Tablo 2’de sunulmuştur. Deneysel verilerin uygulandığı izoterm modellerinde R^2 değerine ($> \%85$) göre tüm izoterm modellerinin uygun olduğu görülmektedir. Uygulanan modeller ve deneysel veriler ile elde edilen yüksek R^2 değeri, AÇ’nin Ni(II) biyosorpsiyonunda yüksek adsorpsiyon kapasitesine ve metal çekimine sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Sorbent dozu ve Ni(II) derişimlerine göre izoterm sabitleri (Isotherm constants for the sorbent dose and Ni (II) concentrations)

Model	İzoterm Parametreleri	Sorbent Dozajı	Ni(II) Derişimi
Langmuir	R^2	0,91	0,99
	K_L (L/mg)	11,90	3,92
	q_{max} (mg/g)	0,17	2,61
	R_L	0,0033	0,010
Freundlich	R^2	0,95	0,87
	K_F (L/g)	4086	2,89
	n	0,44	2,84
Temkin	R^2	0,99	0,92
	A_T (L/g)	0,14	2,78
	b_T	-15,705	2,0973
D-R	R^2	0,98	0,91
	β (mol ² /j ²)	-24,763	-1,0727
	q_{max} (mg/g)	24,70	8,64
	E (kJ/mol)	0,142	0,682

Öncelikle gaz-katı faz adsorpsiyonunu tanımlamak için tasarlanmış olan Langmuir adsorpsiyonu, ayrıca çeşitli adsorbentlerin adsorpsiyon kapasitesini ölçmek ve karşılaştırmak amacıyla da kullanılmaktadır (Elmorsi, 2011; Ayawei vd., 2017). Langmuir izotermi, metal iyonlarının alımının, homojen bir yüzey üzerinde tek tabakalı adsorpsiyon meydana geldiğini ve sorplanan türler arasında bir etkileşim olmadığını varsaymaktadır (Sahu vd., 2020; Panneerselvam vd., 2011). Adsorpsiyon ve desorpsiyon hızı, sorbentin sırasıyla açık ve kapalı yüzeylerinin oranlarına bağlıdır. Çalışmada tüm modeller için yüksek R^2 değerleri elde edilmiş olmakla birlikte Ni(II) dozajı için en yüksek R^2 (0,99), Langmuir izoterminde, adsorpsiyon dozajı için ise Temkin izoterminde elde edilmiştir ($R^2=0,99$).

Langmuir izotermine başlıca karakteristiği olan boyutsuz parametresi olan ayırma faktörü (R_L), Ni(II) derişimi ve adsorpsiyon dozajı için sırasıyla 0,010 ve 0,0033 olarak hesaplanmıştır. $R_L > 1$ olması adsorpsiyonun Langmuir’e göre elverişsiz, $R_L = 1$ olması doğrusal, $0 < R_L < 1$ olması uygun ve $R_L = 0$ olması geri döndürülemez olduğunu ifade etmektedir (Ayawei vd., 2017). Bu çalışmada Ni(II)’nin AÇ’ye biyosorpsiyonunun Langmuir modeline göre elverişli olduğunu göstermektedir.

Freundlich izotermi heterojen yüzeylerde oluşan adsorpsiyon süreçlerine ve adsorpsiyon işleminin çok katmanlı olması durumunda uygulanabilmektedir (Sahu vd., 2020; Ayawei vd., 2017). Doğrusal grafiklerden adsorpsiyon dozajı için bulunan R^2 (%95) değeri, biyosorpsiyonunun Freundlich modeli tarafından da uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca $1/n$ heterojenite faktörüdür ve yüzey ne kadar heterojense $1/n$ değeri o kadar sıfıra yakındır (Çakmak ve Canbaz 2020). $1/n$ değeri adsorbent/adsorbat sisteminin uygunluğu ve kapasitesi hakkında bilgi vermektedir. Pek çok durumda $1 < n < 10$ arasındaki değerler adsorpsiyonun verimli olduğunu ifade etmektedir (Shahwan ve Erten, 2002; Bhattacharyya ve Sharma, 2005). Bu çalışmada adsorpsiyon dozajı ve Ni(II) derişimi için bulunan n değerleri adsorpsiyonun verimli olduğunu göstermektedir.

Temkin izotermi, adsorbentler ve adsorbe edilecek metal iyonları arasındaki etkileşimleri dikkate almaktadır ve serbest sorpsiyon enerjisinin yüzey kapsama alanının bir işlevi olduğu varsayımına dayanmaktadır. D-R modeli ise yüzey enerjilerinin heterojenliğini tahmin etmek için kullanılmaktadır (Das vd., 2014). D-R modeli, derişim ve sorbent miktarı için adsorpsiyon enerjileri (E) sırasıyla 0,682 kJ/mol ve 0,142 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. 8–16 kJ/mol arasındaki E değeri, sorpsiyonun esas olarak iyon değişimi yoluyla gerçekleştiğini göstermektedir. 8 kJ/mol’ün altındaki bir “E” değeri ise, sorpsiyon mekanizmasının fiziksel bir etkileşimlerle açıklanabileceğini göstermektedir (Sawalha vd., 2006). Bu çalışmada E değerleri 8 kJ/mol’ün altında hesaplanması sorpsiyon mekanizmasının fiziksel etkileşimlerle açıklanabileceğini göstermektedir.

Yapmış olduğumuz çalışmada elde edilen Ni(II)’nin AÇ’ye biyosorpsiyon kapasite değerleri, AÇ ile yapılan diğer çalışmaları ile uyumluluk göstermektedir (Yang vd., 2016; Wasewar vd., 2008; Panneerselvam vd., 2011; Nuhoglu

ve Malkoc, 2009; Ma vd., 2013). Ayrıca AÇ'nin, Ni(II) gideriminde diğer atık maddeler ile rekabet edebilir bir doğal atık madde olduğu görülmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Ni(II) için farklı adsorbentlerin biyosorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması (Comparison of biosorption capacities of different adsorbents for Ni(II))

Adsorbent	q _{max} (mg Ni(II)/g, biyosorpsiyon kapasitesi)	Kaynak
AÇ	18,00	Bu çalışma
AÇ	1,07	Aikpokpodion vd., 2010
AÇ	4,9	Ahluwalia ve Goyal, 2005
AÇ	38,30	Panneerselvam vd., 2011
AÇ	42,19	Tran vd., 2017
Pirinç samanı	21,23	Tran vd., 2017
Çay fabrikası atığı	15,26	Malkoc ve Nuhoglu, 2005
Yeşil çay atığı	0,3116	Yang vd., 2016
Su yosunu	70	Bermúdez vd., 2011
Atlantik algi	45	Bermúdez vd., 2011
Mikroalg (<i>C. vulgaris</i>)	48–60	Aksu, 2002
<i>Sargassums p. ve Padinas p.</i>	35	Sheng vd., 2004
<i>Ulvas p. ve Gracilarias p.</i>	17	Sheng vd., 2004
Ekmek mayası	11,38	Padmavathy vd., 2003
Şeker kamışı sapı kalıntısı	2,234	Alomá vd., 2012
Siyah havuç kalıntısı	6,511	Güzel vd., 2008
Greyfurt kabuğu	46,13	Torab-Mostaedi vd., 2013
Pirinç samanı	11,5	Krishnani vd., 2008
Arpa samanı	36,80	Thevannan vd., 2010
Kaju fıstığı kabuğu	18,868	Kumar vd., 2011
Fıstık kabuğu	2,15	Yıldız, 2018

3.7 Adsorpsiyon Kinetikleri (Adsorption kinetics)

Adsorpsiyon sürecini daha iyi anlamak için kinetik çalışma yapılması gereklidir. Adsorpsiyon kinetiği çalışması, adsorpsiyon verimliliğini göstermektedir (Banerjee vd., 2014). Adsorpsiyon sürecinin kinetik analizi, adsorbat alım oranını, adsorpsiyon süreci için gerekli denge süresini ve süreç mekanizmalarını tarif etmektedir. Bu faktörlerin tanımlanması, adsorpsiyonun tasarlanması ve ölçeklendirilmesinde önemlidir (Magdy vd., 2020). Bu çalışmada adsorpsiyon sürecinin hızı ve mekanizması, birinci ve ikinci derece hız eşitlikleri, partikül içi difüzyon modeli (Weber–Morris) ve Elovich modeline uygulanarak araştırılmıştır. Deneysel verilerin uygulandığı bu modellere ait eşitlikler Tablo 4'te sunulmuştur. Ni(II)'nin AÇ'ye biyosorpsiyon kinetikleri, farklı pH ve sıcaklık için incelenmiştir. Hesaplanan kinetik katsayıları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Kinetik model eşitlikleri (Kinetic model equations)

Kinetik modeller	Eşitlikler	Grafik eksenleri	Kaynak
Yalancı I. derece reaksiyon	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 \times t}{2.303}$	$x - \text{ekseni} \rightarrow \log(q_e - q_t)$ $y - \text{ekseni} \rightarrow t$	Özacar ve Şengil 2005
Yalancı II. derece reaksiyon	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$x - \text{ekseni} \rightarrow t/q_t$ $y - \text{ekseni} \rightarrow t$	Ho ve McKay 2000
Weber–Morris modeli	$q_t = k_{id} t^{1/2} + C$	$x - \text{ekseni} \rightarrow t^{1/2}$ $y - \text{ekseni} \rightarrow q_t$	Özcan vd., 2005
Elovich modeli	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln \alpha \beta + \frac{1}{\beta} \ln t$	$x - \text{ekseni} \rightarrow \ln t$ $y - \text{ekseni} \rightarrow q_t$	Özacar ve Şengil 2005

Tablo 5. Ni(II) için farklı pH ve sıcaklıklarda kinetik katsayılar (Kinetic coefficients for Ni(II) at different pH and temperatures)

	q_e mg/g	Yalancı I. dereceden			Yalancı II. dereceden			Weber-Morris			Elovich		
		K_1	q_e	R^2	K_2	q_e	R^2	k_{id}	C	R^2	β	α	R^2
pH													
4	7,2	0,13	0,52	0,87	0,18	8,0	0,99	0,5	5,35	0,81	1,2	924,2	0,95
5	8,55	0,05	0,47	0,86	0,10	8,5	0,99	0,4	5,98	0,91	1,7	25203	0,90
6	8,8	0,05	0,59	0,44	0,11	8,8	0,99	0,5	5,99	0,90	1,3	3439	0,97
7	9,2	0,09	0,38	0,83	0,10	9,0	0,99	0,7	5,31	0,82	0,9	220,9	0,95
T (°C)													
25	8,80	0,13	0,23	0,98	0,07	9,1	0,99	0,77	4,87	0,95	0,9	141,6	0,99
35	8,55	0,05	0,47	0,86	0,10	8,5	0,99	0,43	5,98	0,91	1,7	25060	0,90
45	9,10	0,11	0,25	0,95	0,07	9,3	0,99	0,74	5,27	0,99	0,9	260,5	0,95

Deney başlangıcında, adsorbentin aktif sorpsiyon bölgelerinin açık olması, metal iyonlarının aktif bölgeler ile hızla temas etmesini sağlamaktadır. Çözelti katı-sıvı ara kesitinde metal derişim farklılığı, adsorpsiyon sürüklenme kuvvetinin deney başlangıcında yüksek olması sonucu (Amarasinghe ve Williams, 2007) kısa karıştırma sürelerinde AÇ'ye, Ni(II) biyosorpsiyonunun hızla gerçekleştiği belirlenmiştir. Deney süresince, çözünenin adsorbente daha yavaş difüzyonu etkisi ile adsorpsiyon yavaşlayabilmektedir (Amarasinghe ve Williams, 2007). Uygulanan modeller için R^2 değeri %90'nın üzerinde olmasına rağmen gerek pH gerekse sıcaklık çalışması için en yüksek R^2 değeri (0,99) II. dereceden hız eşitliği modeli için belirlenmiştir. Aynı zamanda deneysel olarak belirlenen adsorpsiyon kapasitesi değeri en yakın II. dereceden hız eşitliği modelinde tespit edilmiştir. Bu duru, sorpsiyonun ikinci dereceden model tarafından kontrol edilebileceğini göstermektedir.

Çalışmamda elde edilen veriler Ni(II)'nin AÇ'ye biyosorpsiyonu ile ilgili yapılan diğer çalışmaları ile uyumluluk göstermektedir (Yang vd., 2016; Wasewar vd., 2008; Shah vd., 2015; Nuhoglu ve Malkoc, 2009; Ma vd., 2013).

3.8 Adsorpsiyon Termodinamiği (Adsorption Thermodynamics)

Temel termodinamik kavramına dayanılarak, yalıtılmış bir sistemde enerjinin kazanılamayacağı veya kaybedilemeyeceği ve entropi değişikliğinin tek itici güç olduğu varsayılmaktadır. Çevre mühendisliği uygulamasında, hangi sürecin kendiliğinden gerçekleşeceğini belirlemek için hem enerji hem de entropi faktörleri göz önünde bulundurulmalıdır (Malkoc ve Nuhoglu, 2005; Demirbaş vd., 2002). AÇ'ye, Ni(II) biyosorpsiyon termodinamiği Eşitlik (3)–(5) ile değerlendirilmiştir (Kumar vd., 2010; Cojocar vd., 2009).

$$\Delta G^\circ = -R_g \times T \times \ln K_L \quad (3)$$

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H^\circ}{R_g \times T} + Sabit \quad (4)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \times \Delta S^\circ \quad (5)$$

Denklemlerde, ΔG° , Gibbs serbest enerji değişimi, adsorpsiyon ısısı olarak da bilinen adsorpsiyon entalpi değişimi (ΔH°), entropi değişimi (ΔS°) ve T, mutlak sıcaklık olmak üzere; R_g , gaz sabiti, (8,314 joule/mol.K) olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (3)–(5)'te verilen denklemler kullanılarak elde edilen parametreler Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Termodinamik parametreleri (Thermodynamic parameters)

T	ΔG° (kJ/mol.K)	ΔH° (kJ/mol.K)	ΔS° (kJ/mol.K)
293	-22,69		
298	-14,91		
303	-13,65		
308	-16,53	-11,412	0,031
313	-17,02		
318	-14,55		
323	-12,97		

Tablo 6'da görüldüğü gibi, $\Delta S^\circ = 0,031$ kJ/mol.K, $\Delta H^\circ = -11,412$ kJ/mol.K ve $\Delta G^\circ = -12,97/-22,69$ kJ/mol.K olarak hesaplanmıştır. Tüm sıcaklıklarda ΔG° negatif olarak hesaplanmış ve sıcaklık artışıyla ΔG° artmaktadır. İncelenen tüm sıcaklıklarda ΔG° 'nin negatif değerleri, biyosorpsiyon işleminin kendiliğinden gerçekleştiğini ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi bir adsorpsiyonun elde edildiğini (Malkoc ve Nuhoglu, 2005), ΔH° 'nin negatif olması biyosorpsiyon sürecinin ısı veren (ekzotermik) doğası ile açıklanabileceğini (Nollet vd., 2003; Bermúdez vd., 2011) göstermektedir. ΔS° 'nin pozitif değeri ise metal iyonlarının adsorbent üzerine adsorpsiyonu sırasında katı/çözelti arayüzünde artan rastgelelik olduğunu bildirmektedir (Aksu, 2002).

Bu çalışma da termodinamik verileri, Ni(II)'nin AÇ'ye biyosorpsiyonunun ekzotermik bir reaksiyon olduğunu, negatif serbest enerji değişimi ise biyosorpsiyonun kendiliğinden gerçekleştiğini göstermektedir. Adsorpsiyonunun fiziksel veya kimyasal adsorpsiyon olduğu, serbest enerji değişiminin büyüklüğünden belirlenmektedir. Ayrıca $\Delta G^\circ \geq -15$ kJ/mol.K ise fiziksel adsorpsiyon, $\Delta G^\circ \leq -30$ kJ/mol.K ise kimyasal adsorpsiyon gerçekleştiğini göstermektedir (Bermúdez vd., 2011). Çalışmada ΔG° 'nin, $-12,97$ kJ/mol.K ile $-22,69$ kJ/mol.K aralığında hesaplanması, elektrostatik etki ile fiziksel adsorpsiyonun arttığını göstermektedir.

3.9 AÇ'nin Desorpsiyon Verimi ve Yeniden Kullanımı (Desorption Efficiency and Reuse of TW)

Desorpsiyon çalışması, sorbentin tekrar kullanılabilirlik potansiyelinin belirlenmesinde önemlidir. Desorpsiyon verimi ve AÇ'nin yeniden kullanımında biyosorpsiyon kapasitesindeki (q_{yk}) değişim incelenmiştir. Metal yüklü AÇ'den metal iyonunun desorpsiyonunu araştırmak amacıyla verimli bir metal desorbantı olduğu bildirilen asit çözücüler (Shroff ve Vaidya, 2011; Reddy vd., 2011; Padmavathy, 2008; Iqbal ve Saeed, 2007) ve saf su kullanılarak desorpsiyon verimleri karşılaştırılmıştır (Tablo 7). Desorpsiyon verimi (% E) Eşitlik (6) kullanılarak hesaplanmıştır (León vd., 2018).

$$E = \frac{C_d}{C_a} \times 100 \quad (6)$$

Buradaki C_d ve C_a , sırasıyla desorbe ve adsorbe edilen Ni(II) derişimleridir (mg/L).

Tablo 7. Desorpsiyon verimi ve sorpsiyon kapasitesinin değişimi (Desorption efficiency and change of sorption capacity)

Kullanılan çözücü	Desorpsiyon verimi (%)	Desorpsiyon sonrası AÇ'nin yeniden kullanılması durumunda q_{yk} (mg Ni(II)/g)
0,1 M H ₂ SO ₄	57,7	8,05
0,1 M HCl	59,6	5,15
Saf Su	14,9	4,98

Desorpsiyon çalışması AÇ sorbentinin özellikle çeşitli asidik çözeltiler kullanılarak Ni(II) iyonlarından ayrıldığını göstermektedir. HCl ve H₂SO₄ kullanımında sırasıyla %59,6 ve 57,7 desorpsiyon verimleri elde edilmiştir. Ayrıca çay sorbentinin tekrar kullanımında sorbent özelliklerinin çok değişmediği q_e değerleri ile belirlenmiştir. Saf su ile geri yıkamada kazanım verimi, asit çözeltilere göre daha düşük elde edilmiştir. AÇ adsorpsiyon bölgelerinin saf su ile yıkanmadığından, Ni(II)'nin sorpsiyon veriminin AÇ'nin tekrar kullanımında önemli ölçüde azaldığı tahmin edilmektedir. Atık çayın bir ekonomik değeri olmamasına rağmen, Ni(II) geri kazanılabilir ve AÇ tekrar biyosorpsiyonda kullanılabilir.

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada yaygın olarak tüketilen çay atıklarının Ni(II)'nin biyosorpsiyonunda kullanılabilirliği incelenmiştir. Karıştırma süresi 30 dk. olarak belirlenen kesikli deneysel çalışmalarda q_e , 18,0 mg Ni(II)/g AÇ olarak hesaplanmıştır. Ni(II)'nin maksimum sorpsiyonu pH 5-7 arasında elde edilmiştir. İzoterm araştırması, Ni(II) biyosorpsiyonunun Langmuir ve Temkin tarafından daha iyi tanımlandığını ortaya koymuştur. Ayrıca, kinetik çalışmasında Ni(II) biyosorpsiyonunun yalancı II. dereceden kinetik modeline uyduğu tespit edilmiştir. Ni(II)'nin AÇ'ye biyosorpsiyonu kendiliğinden, ısı veren ve fiziksel adsorpsiyon olarak tanımlanmaktadır.

Deneysel veriler özellikle ülkemizde oldukça yüksek miktarda tüketilen çay atıklarının ağır metallerin gideriminde ön işlem olarak uygulanabileceğini göstermektedir. Evsel katı atık olarak uzaklaştırılan AÇ'nin hiçbir ücret ödenmeden temin edilebileceği göz önünde bulundurulduğunda ekonomik açıdan katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yapmış olduğumuz çalışma AÇ'nin desorpsiyon sonrasında yeniden kullanılabilirliğini de göstermektedir. Ancak AÇ'nin desorpsiyon verimi düştüğünde doğaya ve canlılara zarar vermeden uygun bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahluwalia, S.S. & Goyal, D., 2005. Removal of heavy metals by waste tea leaves from aqueous solution. *Engineering in life Sciences*, 5(2), 158–162.
- Ahmady-Asbchin, S. & Bahrami, A.M., 2011. Nickel biosorption by immobilized biomass of *Bacillus* sp. from aqueous solution. *Advances in Environmental Biology*, 1656-1663.
- Aikpokpodion, P.E., Ipinmoroti, R.R., & Omotoso, S.M., 2010. Biosorption of nickel (II) from aqueous solution using waste tea (*Camella cinencis*) materials. *American–Eurasian Journal of Toxicological Sciences*, 2(2),72–82.
- Akar, T., Celik, S., Gorgulu Ari, A., & Tunali Akar, S., 2013. Nickel removal characteristics of an immobilized macro fungus: equilibrium, kinetic ve mechanism analysis of the biosorption. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(4), 680–689.
- Aksu, Z., & Dönmez, G., 2006. Binary biosorption of cadmium (II) ve nickel (II) onto dried *Chlorella vulgaris*: Co-ion effect on mono-component isotherm parameters. *Process Biochemistry*, 41(4), 860-868.
- Aksu, Z., 2002. Determination of the equilibrium, kinetic ve thermodynamic parameters of the batch biosorption of nickel (II) ions onto *Chlorella vulgaris*. *Process Biochemistry*, 38(1), 89–99.
- Ali, I., Alharbi, O.M., Allothman, Z.A. & Badjah, A.Y., 2018. Kinetics, Thermodynamics, ve modeling of Amido Black dye photodegradation in water using Co/TiO₂ nanoparticles. *Photochemistry ve photobiology*, 94(5), 935–941.
- Alomá, I., Martín–Lara, M.A., Rodríguez, I.L., Blázquez, G. & Calero, M., 2012. Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions by biosorption on sugarcane bagasse. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(2), 275–281.
- Al-Samman, T., 2015. Effect of heavy metal impurities in secondary Mg alloys on the microstructure ve mechanical properties during deformation. *Materials & Design* (1980-2015), 65, 983-988.
- Alzahrani, N.H., Alamoudi, K.H., & El-Gendy, M.M.A.A., 2017. Molecular Identification ve Nickel Biosorption with the Dead Biomass of Some Metal Tolerant Fungi. *J Microb Biochem Technol*, 9, 310-315.
- Amarasinghe, B.M.W.P.K. & Williams, R.A., 2007. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu ve Pb from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 132(1–3), 299–309.
- Aslan, S., Yildiz, S., & Ozturk, M., 2018. Biosorption of Cu²⁺ ve Ni²⁺ ions from aqueous solutions using waste dried activated sludge biomass. *Polish Journal of Chemical Technology*, 20(3), 20-28.
- Aslan, S., Yildiz, S., Ozturk, M., Polat, A., 2016. Adsorption of heavy metals onto waste tea. *European Scientific Journal*, Special Edition, 111-117.
- Ayawei, N., Ebelegi, A.N. & Wankasi, D., 2017. Modelling ve interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*.
- Banerjee, S., Chattopadhyaya, M.C., Srivastava, V. & Sharma, Y.C., 2014. Adsorption studies of methylene blue onto activated saw dust: kinetics, equilibrium, ve thermodynamic studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 790–799.
- Benguella, B., & Benaissa, H., 2002. Cadmium removal from aqueous solutions by chitin: kinetic ve equilibrium studies. *Water research*, 36(10), 2463–2474.
- Bermúdez, Y.G., Rico, I.L.R., Bermúdez, O.G. & Guibal, E., 2011. Nickel biosorption using *Gracilaria caudata* ve *Sargassum muticum*. *Chemical Engineering Journal*, 166(1), 122–131.
- Bhattacharyya, K.G., & Sharma, A., 2005. Kinetics ve thermodynamics of methylene blue adsorption on neem (*Azadirachta indica*) leaf powder. *Dyes ve pigments*, 65(1), 51–59.
- Cay, S., Uyanık, A. & Özaşık, A., 2004. Single ve binary component adsorption of copper (II) ve cadmium (II) from aqueous solutions using tea–industry waste. *Separation ve purification technology*, 38(3), 273–280.
- Chen, X., Huang, G. & Wang, J., 2013. Electrochemical reduction/oxidation in the treatment of heavy metal wastewater. *Journal of Metallurgical Engineering (ME) Volume*, 2(4).
- Chen, Z., Ma, W., Han, M., 2008. Biosorption of nickel ve copper onto treated alga (*Undaria pinnatifida*): Application of isotherm ve kinetic models. *Journal of hazardous materials*, 155(1-2), 327-333.
- Cheung, C.W., Porter, J.F., & McKay, G., 2001. Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using bone char. *Water research*, 35(3), 605–612.
- Cojocar, C., Diaconu, M., Cretescu, I., Savić, J., & Vasić, V., 2009. Biosorption of copper (II) ions from aqua solutions using dried yeast biomass. *Colloids ve Surfaces A: Physicochemical ve Engineering Aspects*, 335(1–3), 181–188.
- Congeevaram, S., Dhanarani, S., Park, J., Dexilin, M., & Thamaraiselvi, K., 2007. Biosorption of chromium ve nickel by heavy metal resistant fungal ve bacterial isolates. *Journal of hazardous materials*, 146(1-2), 270-277.
- Ćurković, L., Trgo, M., Mioč, A.R., & Medvidović, N.V., 2009. Removal of Cu ve Pb ions from aqueous solutions by electric furnace slag: Kinetic ve thermodynamic aspects.
- Çakmak, N.K., & Canbaz, G.T., 2020. TiO₂ Nanopartikülü ve TiO₂/Aktif Çamur Sentezi ile Sulu Çözümlerden Cu (II) İyonlarının Adsorpsiyonu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 86–98.
- Das, B., Mondal, N.K., Bhaumik, R., & Roy, P., 2014. Insight into adsorption equilibrium, kinetics ve thermodynamics of lead onto alluvial soil. *International Journal of Environmental Science ve Technology*, 11(4), 1101–1114.
- Demirbas, A, 1999, Evaluation of biomass materials as energy sources: Upgrading of tea waste by briquetting process. *Energy sources*, 21(3), 215-220.
- Demirbaş, O., Alkan, M., & Doğan, M., 2002. The removal of Victoria blue from aqueous solution by adsorption on a low–cost material. *Adsorption*, 8(4), 341–349.
- Dermentzis, K., Christoforidis, A., & Valsamidou, E., 2011. Removal of nickel, copper, zinc ve chromium from synthetic ve industrial wastewater by electrocoagulation. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(5), 697–710.

- Eligwe, C.A., Okolue, N.B., Nwambu, C.O., & Nwoko, C.I., 1999. Adsorption thermodynamics ve kinetics of mercury (II), cadmium (II) ve lead (II) on lignite. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 22(1), 45-49.
- Elmorsi, T.M., 2011. Equilibrium isotherms ve kinetic studies of removal of methylene blue dye by adsorption onto miswak leaves as a natural adsorbent. *Journal of Environmental Protection*, 2(06), 817.
- Fu, F., & Wang, Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*, 92(3), 407-418.
- Güzel, F., Yakut, H., & Topal, G., 2008. Determination of kinetic ve equilibrium parameters of the batch adsorption of Mn (II), Co (II), Ni (II) ve Cu (II) from aqueous solution by black carrot (*Daucus carota* L.) residues. *Journal of hazardous materials*, 153(3), 1275-1287.
- Hasar, H., 2003. Adsorption of nickel (II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from almond husk. *Journal of hazardous materials*, 97(1-3), 49-57.
- Heredia, J.B., & Martín, J.S., 2009. Removing heavy metals from polluted surface water with a tannin-based flocculant agent. *Journal of hazardous materials*, 165(1-3), 1215-1218.
- Ho, Y.S., & McKay, G., 2000. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Water research*, 34(3), 735-742.
- Ho, Y.S., Porter, J.F., & McKay, G., 2002. Equilibrium isotherm studies for the sorption of divalent metal ions onto peat: copper, nickel ve lead single component systems. *Water, air, ve soil pollution*, 141(1-4), 1-33.
- Ho, Y.S., Wase, D.J., & Forster, C.F., 1995. Batch nickel removal from aqueous solution by sphagnum moss peat. *Water Research*, 29(5), 1327-1332.
- Ipek, U., 2005. Removal of Ni (II) ve Zn (II) from an aqueous solution by reverse osmosis. *Desalination*, 174(2), 161-169.
- Iqbal, M., & Saeed, A., 2007. Production of an immobilized hybrid biosorbent for the sorption of Ni (II) from aqueous solution. *Process Biochemistry*, 42(2), 148-157.
- Jamali, H.A., Mahvi, A.H., & Nazmara, S., 2009. Removal of cadmium from aqueous solutions by hazel nut shell. *Adsorption*, 2, 4.
- Jianlong, W., Yi, Q., Horan, N., & Stentiford, E., 2000. Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass. *Bioresource Technology*, 75(2), 157-161.
- Keränen, A., Leiviskä, T., Salakka, A., & Tanskanen, J., 2015. Removal of nickel ve vanadium from ammoniacal industrial wastewater by ion exchange ve adsorption on activated carbon. *Desalination ve Water Treatment*, 53(10), 2645-2654.
- Kovacevic, F.Z., Sipos, L., Briski, F., Sipos, L., & Briski, F., 2000. Biosorption of chromium, copper, nickel ve zinc ions onto fungal pellets of *Aspergillus niger* 405 from aqueous solutions.
- Kratochvil, D., & Volesky, B., 1998. Advances in the biosorption of heavy metals. *Trends in biotechnology*, 16(7), 291-300.
- Krishnani, K.K., Meng, X., Christodoulatos, C., & Boddu, V.M., 2008. Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *Journal of hazardous materials*, 153(3), 1222-1234.
- Kumar, P.S., Ramalingam, S., Kirupha, S.D., Murugesan, A., Vidhyadevi, T., & Sivanesan, S., 2011. Adsorption behavior of nickel (II) onto cashew nut shell: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism ve process design. *Chemical Engineering Journal*, 167(1), 122-131.
- León, O., Muñoz-Bonilla, A., Soto, D., Pérez, D., Rangel, M., Colina, M., & Fernández-García, M., 2018. Removal of anionic ve cationic dyes with bioadsorbent oxidized chitosans. *Carbohydrate polymers*, 194, 375-383.
- Lin, C.J., & Chang, J.E., 2001. Effect of fly ash characteristics on the removal of Cu (II) from aqueous solution. *Chemosphere*, 44(5), 1185-1192.
- Lin, S.H., & Juang, R.S., 2002. Heavy metal removal from water by sorption using surfactant-modified montmorillonite. *Journal of hazardous materials*, 92(3), 315-326.
- Liu, N., Lin, D., Lu, H., Xu, Y., Wu, M., Luo, J., & Xing, B., 2009. Sorption of lead from aqueous solutions by tea wastes. *Journal of environmental quality*, 38(6), 2260-2266.
- Ma, H.F., Li, W., Han, Q.J., & Wang, J., 2013. Research on the Adsorption Kinetics ve Thermal Adsorption Model of Ni (II) with Tea Dust [J]. *Science Technology ve Engineering*, 16.
- Magdy, Y.H., Altaher, H., & Al Yaqout, A.F., 2020. Sustainable Adsorptive Removal Of Nickel ve Chromium Using An Eco-Friendly Industrial Waste: A Kinetic Study. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 55(2).
- Malkoc, E., & Nuhoglu, Y., 2005. Investigations of nickel (II) removal from aqueous solutions using tea factory waste. *Journal of hazardous materials*, 127(1-3), 120-128.
- Malkoc, E., & Nuhoglu, Y., 2006a. Removal of Ni (II) ions from aqueous solutions using waste of tea factory: Adsorption on a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1-3), 328-336.
- Malkoc, E., & Nuhoglu, Y., 2006b. Fixed bed studies for the sorption of chromium (VI) onto tea factory waste. *Chemical engineering science*, 61(13), 4363-4372.
- Malkoc, E., & Nuhoglu, Y., 2003. The removal of chromium (VI) from synthetic wastewater by *Ulothrix zonata*.
- Meena, A.K., Mishra, G.K., Rai, P.K., Rajagopal, C., & Nagar, P.N., 2005. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbent. *Journal of hazardous materials*, 122(1-2), 161-170.
- Moawad, M.N., El-Sayed, A.A., & El-Naggar, N.A., 2020. Biosorption of cadmium ve nickel ions using marine macrophyte, *Cymodocea nodosa*. *Chemistry ve Ecology*, 1-17.
- Moreira, V.R., Lebron, Y.A.R., Freire, S.J., Santos, L.V.S., Palladino, F., & Jacob, R.S., 2019. Biosorption of copper ions from aqueous solution using *Chlorella pyrenoidosa*: Optimization, equilibrium ve kinetics studies. *Microchemical Journal*, 145, 119-129.
- Murthy, Z.V.P., & Chaudhari, L.B., 2008. Application of nanofiltration for the rejection of nickel ions from aqueous solutions ve estimation of membrane transport parameters. *Journal of hazardous materials*, 160(1), 70-77.
- Nollet, H., Roels, M., Lutgen, P., Van der Meeren, P., & Verstraete, W., 2003. Removal of PCBs from wastewater using fly ash. *Chemosphere*, 53(6), 655-665.
- Nuhoglu, Y., & Malkoc, E., 2009. Thermodynamic ve kinetic studies for environmentally friendly Ni (II) biosorption using waste pomace of olive oil factory. *Bioresource Technology*, 100(8), 2375-2380.

- Özacar, M., & Şengil, İ.A., 2005. A kinetic study of metal complex dye sorption onto pine sawdust. *Process Biochemistry*, 40(2), 565-572.
- Özcan, A., Özcan, A.S., Tunali, S., Akar, T., & Kiran, I., 2005. Determination of the equilibrium, kinetic ve thermodynamic parameters of adsorption of copper (II) ions onto seeds of *Capsicum annum*. *Journal of hazardous materials*, 124(1-3), 200-208.
- Özdemir, S., Kilinc, E., Poli, A., Nicolaus, B., & Güven, K., 2009. Biosorption of Cd, Cu, Ni, Mn ve Zn from aqueous solutions by thermophilic bacteria, *Geobacillus toebii* sub. sp. *decanicus* ve *Geobacillus thermoleovorans* sub. sp. *stromboliensis*: Equilibrium, kinetic ve thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, 152(1), 195-206.
- Öztürk, N.K., Öztürk, S., Sütçü, M., Sever, K., 2015. Fındık kabuğu ve evsel çay atığı katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerin belirlenmesi". XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Padmavathy, V., 2008. Biosorption of nickel (II) ions by baker's yeast: Kinetic, thermodynamic ve desorption studies. *Bioresource Technology*, 99(8), 3100-3109.
- Padmavathy, V., Vasudevan, P., & Dhingra, S.C., 2003. Biosorption of nickel (II) ions on Baker's yeast. *Process Biochemistry*, 38(10), 1389-1395.
- Panda, G.C., Das, S.K., Bandopadhyay, T.S., & Guha, A.K., 2007. Adsorption of nickel on husk of *Lathyrus sativus*: behavior ve binding mechanism. *Colloids ve Surfaces B: Biointerfaces*, 57(2), 135-142.
- Panneerselvam, P., Bala, V., Thinakaran, N., Baskaralingam, P., Palanichamy, M., & Sivanesan, S., 2009. Removal of nickel (II) from aqueous solutions by adsorption with modified ZSM-5 zeolites. *Journal of Chemistry*, 6(3), 729-736.
- Panneerselvam, P., Morad, N., & Tan, K.A., 2011. Magnetic nanoparticle (Fe₃O₄) impregnated onto tea waste for the removal of nickel (II) from aqueous solution. *Journal of hazardous materials*, 186(1), 160-168.
- Papadopoulos, A., Fatta, D., Parperis, K., Mentzias, A., Haralambous, K.J., & Loizidou, M., 2004. Nickel uptake from a wastewater stream produced in a metal finishing industry by combination of ion-exchange ve precipitation methods. *Separation ve Purification Technology*, 39(3), 181-188.
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A., 2009. Adsorption of copper (II), chromium (III), nickel (II) ve lead (II) ions from aqueous solutions by meranti sawdust. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 969-977.
- Rao, M., Parwate, A.V., & Bhole, A.G., 2002. Removal of Cr⁶⁺ ve Ni²⁺ from aqueous solution using bagasse ve fly ash. *Waste management*, 22(7), 821-830.
- Reddy, D.H.K., Ramana, D.K.V., Seshaiyah, K., & Reddy, A.V.R., 2011. Biosorption of Ni (II) from aqueous phase by *Moringa oleifera* bark, a low cost biosorbent. *Desalination*, 268(1-3), 150-157.
- Rizwan, M., Naz, A., Khan, A., Shah, W., Mujtaba, G., Syed, M., ... & Fatima, N., 2020. Role of Pretreatment in Adsorption of Cobalt, Mercury ve Nickel by Native Algae. In *Frontiers in Water-Energy-Nexus—Nature-Based Solutions, Advanced Technologies ve Best Practices for Environmental Sustainability* (pp. 521-524). Springer, Cham.
- Sahu, S., Pahi, S., Sahu, J.K., Sahu, U.K., & Patel, R.K., 2020. Kendu (*Diospyros melanoxylon* Roxb) fruit peel activated carbon— an efficient bioadsorbent for methylene blue dye: equilibrium, kinetic, ve thermodynamic study. *Environmental Science ve Pollution Research*, 1-14.
- Saini, S., Gill, J. K., Kaur, J., Saikia, H.R., Singh, N., Kaur, I., & Katnoria, J.K., 2020. Biosorption as Environmentally Friendly Technique for Heavy Metal Removal from Wastewater. In *Fresh Water Pollution Dynamics ve Remediation* (pp. 167-181). Springer, Singapore.
- Sawalha, M.F., Peralta-Videa, J.R., Romero-González, J., & Gardea-Torresdey, J.L., 2006. Biosorption of Cd (II), Cr (III), ve Cr (VI) by saltbush (*Atriplex canescens*) biomass: thermodynamic ve isotherm studies. *Journal of Colloid ve Interface Science*, 300(1), 100-104.
- Serencam, H., Uçurum, M., 2019. Taguchi Deney Tasarımı Kullanılarak Uçucu Kül ile Ni (II) Gideriminde Bazı Adsorpsiyon Parametrelerinin Etkinliğinin İrdelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 336-344.
- Shah, J., Jan, M.R., ul Haq, A., & Zeeshan, M., 2015. Equilibrium, kinetic ve thermodynamic studies for sorption of Ni (II) from aqueous solution using formaldehyde treated waste tea leaves. *Journal of Saudi Chemical Society*, 19(3), 301-310.
- Shahwan, T., & Erten, H.N., 2002. Thermodynamic parameters of Cs⁺ sorption on natural clays. *Journal of radioanalytical ve nuclear chemistry*, 253(1), 115-120.
- Shaidan, N.H., Eldemerdash, U., & Awad, S., 2012. Removal of Ni (II) ions from aqueous solutions using fixed-bed ion exchange column technique. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(1), 40-45.
- Sheng, P.X., Ting, Y.P., Chen, J.P., & Hong, L., 2004. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, ve nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity ve investigation of mechanisms. *Journal of colloid ve interface science*, 275(1), 131-141.
- Shirzad Siboni, M., Samadi, M.T., Yang, J.K., & Lee, S.M., 2011. Photocatalytic reduction of Cr (VI) ve Ni (II) in aqueous solution by synthesized nanoparticle ZnO under ultraviolet light irradiation: a kinetic study. *Environmental technology*, 32(14), 1573-1579.
- Shroff, K.A., & Vaidya, V.K., 2011. Kinetics ve equilibrium studies on biosorption of nickel from aqueous solution by dead fungal biomass of *Mucor hiemalis*. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 1234-1245.
- Siddiqui, M.N., Ali, I., Asim, M., & Chanbasha, B., 2020. Quick removal of nickel metal ions in water using asphalt-based porous carbon. *Journal of Molecular Liquids*, 113078.
- Tahir, S.S., & Rauf, N., 2003. Thermodynamic studies of Ni (II) adsorption onto bentonite from aqueous solution. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 35(12).
- Thakur, L.S., & Parmar, M., 2013. Adsorption of heavy metal (Cu²⁺, Ni²⁺ ve Zn²⁺) from synthetic waste water by tea waste adsorbent. *International Journal of Chemical ve Physical Sciences*, 2(6), 6-19.
- Thevannan, A., Mungroo, R., & Niu, C.H., 2010. Biosorption of nickel with barley straw. *Bioresource technology*, 101(6), 1776-1780.

- Torab-Mostaedi, M., Asadollahzadeh, M., Hemmati, A., & Khosravi, A., 2013. Equilibrium, kinetic, ve thermodynamic studies for biosorption of cadmium ve nickel on grapefruit peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(2), 295-302.
- Tran, V.T., Nguyen, D.T., Ho, V.T.T., Hoang, P.Q.H., Bui, P.Q., & Bach, L.G., 2017. Efficient removal of Ni²⁺ ions from aqueous solution using activated carbons fabricated from rice straw ve tea waste. *J. Mater. Environ. Sci*, 8(2), 426-437.
- Tunç Dede, Ö., 2019. Potential Use Of Hazelnut Processing Plant Wastes As A Sorbent For The Simultaneous Removal Of Multi-Elements From Water. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 301-312.
- Vakili, M., Rafatullah, M., Yuan, J., Zwain, H.M., Mojiri, A., Gholami, Z., ... & Cagnetta, G., 2020. Nickel ion removal from aqueous solutions through the adsorption process: a review. *Reviews in Chemical Engineering*, 1(ahead-of-print).
- Villaescusa, I., Fiol, N., Martínez, M., Miralles, N., Poch, J., & Serarols, J., 2004. Removal of copper ve nickel ions from aqueous solutions by grape stalks wastes. *Water research*, 38(4), 992-1002.
- Wahi, R., Kanakaraju, D., & Yusuf, N.A., 2010. Preliminary study on zinc removal from aqueous solution by sago wastes. *Global Journal of Environmental Research*, 4(2), 127-134.
- Wan, S., Ma, Z., Xue, Y., Ma, M., Xu, S., Qian, L., & Zhang, Q., 2014. Sorption of lead (II), cadmium (II), ve copper (II) ions from aqueous solutions using tea waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(9), 3629-3635.
- Wasewar, K.L., Atif, M., Prasad, B., & Mishra, I.M., 2008. Adsorption of zinc using tea factory waste: kinetics, equilibrium ve thermodynamics. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 36(3), 320-329.
- Weng, C.H., Lin, Y.T., Hong, D.Y., Sharma, Y.C., Chen, S.C., & Tripathi, K., 2014. Effective removal of copper ions from aqueous solution using base treated black tea waste. *Ecological engineering*, 67, 127-133.
- Yang, S., Wu, Y., Aierken, A., Zhang, M., Fang, P., Fan, Y., & Ming, Z., 2016. Mono/competitive adsorption of Arsenic (III) ve Nickel (II) using modified green tea waste. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 60, 213-221.
- Yildiz, S., 2018. Artificial neural network approach for modeling of Ni (II) adsorption from aqueous solution by peanut shell. *Ecological Chemistry ve Engineering S*, 25(4), 581-604.



YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİYLE YAZILIM TANIMLI AĞ UYGULAMASI

Şükran DEĞİRMENCİ, Derya YILTAŞ KAPLAN*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Doğrusal Arama,
Tabu Arama,
Yapay Sinir Ağları,
Yapay Zekâ,
Yazılım Tanımlı Ağ.*

Öz

Bu çalışma yazılım tanımlı ağ denetleyicisi kullanarak ağ trafiğini takip etme amacıyla yapılmıştır. Bu doğrultuda denetleyici olarak Floodlight ve çalışma platformu olarak Eclipse kullanılmıştır. Doğruluğu artırmak adına beş ayrı topoloji üzerinde gerçekleştirilen takipler sonrasında paket istatistik bilgileri elde edilmiştir. İstatistik verileri MATLAB üzerinde işlenerek istenilen veri setleri oluşturulmuştur. Bu veri setleri MATLAB'de yer alan nntool vasıtasıyla yapay sinir ağlarında kullanılarak belirli zamanlardaki paket akışı tahmin edilmiştir. Yapay sinir ağları beş ayrı topoloji üzerinde denenmiş ve doğrulukları MAPE ve R² denklemleri ile test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda doğruluğu en yüksek çıkan topoloji üzerinde optimizasyon işlemleri uygulanmıştır. Bu amaç doğrultusunda doğrusal arama, tabu arama, değiştirilmiş tabu arama ve tavlama benzetimi ile tabu arama algoritmasının karışımı olmak üzere toplamda dört ayrı optimizasyon tekniği ile optimizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak çalışmada önerilen karışım algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda en yoğun olan güzergâh en kısa sürede tespit edilmiştir.

SOFTWARE DEFINED NETWORK APPLICATION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES

Keywords

*Linear Search,
Tabu Search,
Artificial Neural Networks,
Artificial Intelligence,
Software Defined Network.*

Abstract

This study has been done to monitor the network traffic using a software defined network controller. For this purpose, Floodlight was used as the controller and Eclipse was used as the development platform. In order to increase the accuracy, the statistical information on packets was obtained after observing five separate topologies. The statistical data were processed on MATLAB and the desired data sets were created. These data sets are used in artificial neural networks via nntool on MATLAB to predict the packet flow at a particular time. Artificial neural networks were tested on five separate topologies and their accuracies were tested with MAPE and R² functions. The optimization operations were applied to the topology having the highest accuracy derived from the performed tests. For this purpose, the optimization tests were verified by four optimization techniques which were linear search, tabu search, modified tabu search and combination algorithm (simulated annealing-tabu search). As a result, with the optimization performed with the proposed combination algorithm, the densest route was determined at the smallest time duration.

Alıntı / Cite

Değirmenci, Ş., Yılmaz-Kaplan, D., (2020). Yapay Zekâ Teknikleriyle Yazılım Tanımlı Ağ Uygulaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 999-1009.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ş. Değirmenci, 0000-0002-8571-0401
D. Yılmaz Kaplan, 0000-0001-8370-8941

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	16.01.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	14.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.09.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: dyiltas@istanbul.edu.tr, +90-212-473-7070

1. Giriş (Introduction)

Gelişen teknoloji ile beraber veri merkezleri gittikçe büyümektedir. Büyüyen veri merkezlerinde ise büyük hacimli, karışık ve düzensiz bilgiler yer almaya başlar. Büyük veri içerisindeki bu bilgilerin anlamlı ve değerli olabilmeleri için işlenmeleri gerekir. Büyük veri geleneksel yöntemlerle işlenemez, yönetilemez ve depolanamaz. Yani geleneksel ağ yönetimi yaklaşımı bu aşamada yetersiz kalır. Daha iyi bir ağ yaklaşımıyla, yeni metodlarla ve daha geniş bir bant aralığıyla bu veriler işlenebilir hale gelmektedir. Yazılım Tanımlı Ağ (YTA) bu ihtiyaçları karşılayan bir yöntem olarak karşımıza çıkar. YTA yönetim kolaylığını, donanım bağımsızlığını, dinamik, esnek ve ölçeklenebilir ağ mimarisini temin eder. Dolayısıyla bu geniş ve karmaşık ağ yönetimine etkili bir çözüm sunar.

Ağların kurulumu ve yönetimi için birden fazla ağ elemanının konfigürasyonu konusunda yetenekli uzmanlar gerekir. Ağ elemanları (anahtarlar, yönlendiriciler, vb.) arasındaki iletişimin karmaşık olduğu durumlarda sistem tabanlı bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzün ağ donanımlarının çoğundaki mevcut programlama arabirimleri ile bunu gerçekleştirmek zordur. Bunu sağlamak için yeni bir ağ modeline ihtiyaç duyulmuştur ve bu esnada YTA kavramı ortaya çıkmıştır (Sezer vd., 2013). YTA'nın geliştirilmesine, standardizasyonuna ve ticarileştirilmesine yönelmiş olan Açık Ağ Oluşturma Vakfı (Open Networking Foundation) kâr amacı gütmeyen bir kuruluştur. Vakıf, YTA'yı en iyi açıklayan tanımını şu şekilde yapmaktadır: YTA, ağ denetiminin iletimden ayrıldığı ve doğrudan programlanabilen yeni bir ağ mimarisidir (Xia vd., 2015).

YTA mimarisi uygulama, kontrol ve veri katmanı olmak üzere üç tane katman ile uygulama-kontrol ve kontrol-veri katmanları arasında olmak üzere iki tane arayüzden oluşmaktadır. Kontrol katmanı temel olarak paketlerin gönderilme işlemlerinin gerçekleştiği yerdir. Veri katmanında paketlerin iletimi esnasında oluşan trafik akışı düzenlenmektedir.

Geleneksel ağ trafiğinde paketin gideceği yeri yönlendirici ve anahtarlar belirlemektedir. Bunlar da kontrol ve veri katmanlarında birbirlerine entegre edilmiş şekilde aynı donanım üzerinde bulunurlar. YTA temel olarak bu iki katmanı birbirinden ayırmaya odaklanmıştır. YTA'da kontrol düzlemi yüksek performanslı bir sunucuya taşınır ve ağ yönetimi merkezi bir denetleyici yazılımı ile gerçekleştirilir. Veri katmanı yönlendiricilerin ve anahtarların yalnızca akış yönlendirme işleminden sorumlu olmasını sağlamaktadır. Kontrol katmanı ise ağ işletim sistemi olarak bilinmektedir. Bu katmanda ağ uygulamaları ve veri katmanı arasındaki iletişim gerçekleşmektedir. Kontrol katmanı ve veri katmanı arasındaki iletişim ise açık kaynak ağ protokolü olan OpenFlow ile sağlanmaktadır (Niyaz vd., 2015). YTA mimarisi ağın doğrudan programlanabilmesini sağlamanın yanında ağ servisleri ve uygulamaları için de gerekli olan alt yapıyı oluşturmaktadır.

İletişim ağının temel amacı, bilgi paketlerini bir noktadan diğerine aktarmaktır. Ağ içinde birden çok düğüme iletim gerçekleştiği için bu da yoğun bir trafik akışına sebep olmaktadır. Bu esnada YTA kullanılarak denetleyici sayesinde, etkin ve verimli trafik akışı sağlanabilmektedir. Böylece yoğunluğa ve çeşitliliğe sebep olan trafiğin oluşturduğu karmaşanın önüne geçilerek, daha basit ve yönetimi daha kolay olan bir anlayış sunulmaktadır.

Bu çalışmada ağlardaki trafik akışının YTA denetleyicisine bağlı olarak gerçekleştirilmesi ve burada elde edilen verilerin yapay zekâ optimizasyon teknikleri kullanılarak optimize edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında yapay sinir ağları (YSA'lar) kullanılarak tahmin üzerine bir uygulama geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın içeriği şöyle devam etmektedir: 2. bölümde kullanılan araç ve yöntemlerle ilgili genel bilgiler, 3. bölümde önerilen metodun uygulama adımları, 4. bölümde uygulamadan elde edilen sonuçlar, son olarak 5. bölümde konu ile ilgili sonuç ve tartışma kısmı yer almaktadır.

2. Genel Bilgiler (General Information)

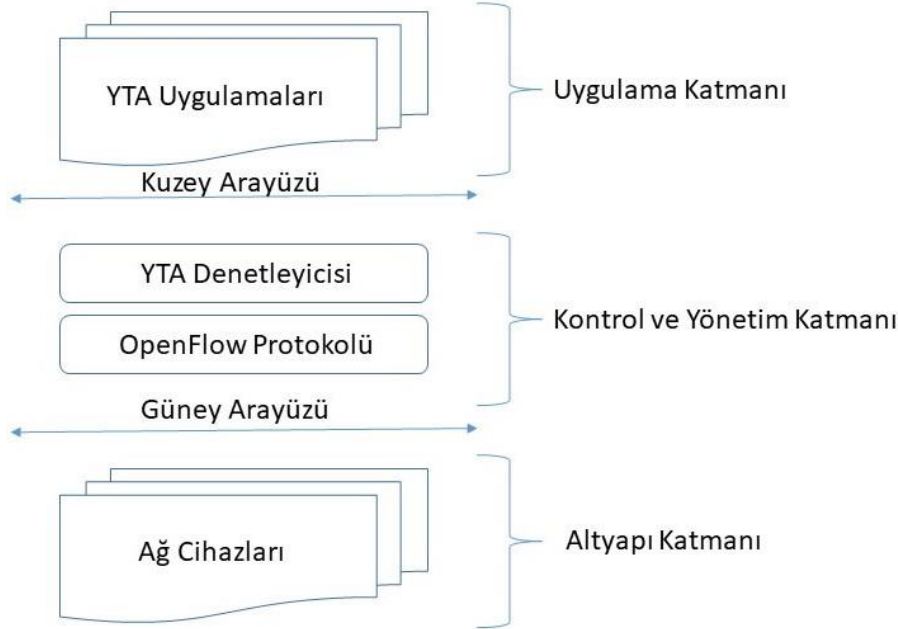
Bu bölümün alt başlıklarında sırasıyla uygulama kısmı için gerekli verilerin elde edildiği denetleyici kavramının ne olduğu ve ağ ortamındaki işleyişi, toplanan ağ verilerinin kullanılması için tercih edilen YSA yöntemi, ağ üzerinde akışın en yoğun olduğu bölgelerin tespiti için faydalanılan yapay zekâ optimizasyon teknikleri arasında yer alan Tabu Arama Algoritması ve Tavlama Benzetimi Algoritması ile ilgili temel açıklamalar yapılmaktadır.

2.1. Denetleyicinin Çalışması (Controller Operation)

YTA mimarisinde kontrol ve yönetim işlemleri merkezi bir denetleyici tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu denetleyici ağ topolojisine ve adres bilgisinin tamamına hâkimdir. Bir anahtar, akış tablosunda bulunmayan bir paket için denetleyiciye paket gönderim isteği yolladığı zaman, denetleyici bu istekleri alır. Sonrasında denetleyici eylemleri alır ve trafiği dinleyerek talep üzerine paket iletim rotalarını tanımlar. OpenFlow denetleyicileri ağ operatörleri tarafından bir kontrol arabirimi ile programlanmaktadır.

Şekil 1’de gösterildiği gibi büyük ağlar daha fazla YTA denetleyicisi, yani YTA uygulama katmanı içerecek şekilde oluşturulmaktadır. Bu uygulama katmanı, ağ sanallaştırması, trafik mühendisliği, yönlendirme, izleme ve hizmet kalitesi servislerinden sorumludur.

Uygulama katmanı ve YTA denetleyicileri arasındaki iletişim, Kuzey Arayüzü olarak adlandırılan bir dizi uygulama programlama arayüzü (API) tarafından gerçekleştirilir. Benzer şekilde YTA denetleyicisi ve OpenFlow ağ aygıtları arasındaki arabirime de Güney Arayüzü denmektedir (Kutay ve Ercan, 2016). YTA mimarisi, karmaşık ağlar üzerinde iletim, denetim ve yönetim kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca ağ katmanları arasındaki etkileşimler sayesinde de trafik akışı açısından güçlü bir kontrol platformu olarak günümüz teknolojisinde önemli bir yer bulmaktadır.



Şekil 1. YTA Katmanları (SDN Layers)

2.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Yapay zekâ farklı türde problemlere getirdiği çözümlere göre çeşitli alt başlıklara ayrılmıştır. Bunlardan en yaygın olan yapay zekâ türleri ise bilgi tabanlı uzman sistemler, bulanık mantık yaklaşımı ve YSA'lardır. Bu çalışmada kullanımı tercih edilen yöntem YSA'lardır.

İnsan beyninin nörolojik yapısı incelendiğinde dijital bilgisayarlardan tamamen farklı bir çalışma mekanizmasına sahip olduğunun anlaşılması üzerine YSA kavramı ortaya çıkmıştır. İnsan beyninin bilgi işleme sistemi oldukça karmaşık bir yapıdadır. Beyinde bulunan ve nöron olarak adlandırılan sinir hücresi günümüzde insanın en hızlı kabul ettiği bilgisayardan bile hızlı olacak şekilde belirli hesaplamalar gerçekleştirmektedir. Sinir ağı, deneysel bilginin depolanması ve kullanımı için uygun hale getirildiği doğal bir eğilime sahip olan, basit işlem birimlerinden oluşan, büyük ölçüde paralel dağıtılmış bir işlemcidir (Haykin, 2009). YSA'lar ise insan beynindeki nöronlar gibi yapay nöronların aynı şekilde bir araya gelerek problemle ilgili bilgi topladıkları ve problemi çözdükleri sistemlerdir. Kısaca YSA, yapay nöronların farklı geometrik yollar kullanarak birbirlerine bağlanmasıyla oluşan ağ sistem yapısıdır (Staub vd., 2015). YSA insan beynine iki temel açıdan benzemektedir. Birincisi, bilginin çevreden bir öğrenme süreci ile ağ tarafından edinilmesidir. İkincisi ise edinilen bilgiyi saklamak için sinaptik ağırlıklar olarak da bilinen dâhili nöron bağlantı kuvvetlerinin kullanılmasıdır. YSA yapısı, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmeye olanak tanırken aynı zamanda değişen ortamlara da uyum sağlamaktadır. YSA'ların en çok tercih edilen özellikleri arasında eksik parametre değerlerini idare edebilme kabiliyeti bulunmaktadır. Bu özelliği sayesinde sınırlı sayıda eğitim setine dayanan bir YSA iyi bir sınıflandırıcı olabilmektedir (Mourrain vd., 2006). YSA'lar bir problemle karşılaştıklarında öğrendiklerini kullanarak karar verebilme yeteneğine sahiptirler. YSA'larda bilgi, ağ tarafından edinilir ve elde edilen bu bilgi nöronlar arasındaki bağlantılar kullanılarak saklanır. YSA'larda ağ, bilgiyi saklayan ve bu bilgiyi işlevsel hale getiren bir işlemci olarak tanımlanabilir (Taşhan, 2017).

Farklı bir problem alanıyla ilgili YSA'ların yardımıyla tasarlanmış olan bir çalışma içerisinde YSA örneğinin giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı şeklindeki genel gösterimi bulunmaktadır (Abu Salam ve Keskin, 2018). Burada ayrıca geri yayılım gibi farklı YSA modellerinin olduğu vurgulanmaktadır.

2.3. Yapay Zekâ Optimizasyon Teknikleri (Artificial Intelligence Optimization Techniques)

Optimizasyon problemlerinin çözümü için meta-sezgisel olarak da bilinen yapay zekâ optimizasyon teknikleri kullanılarak etkili sonuçlar elde edilmektedir. Sezgisel bir algoritma, bir sezgisel işlevi dönüşümlü çağırarak kârı maksimize eden belirli bir çözüm örneğini bulmaya çalışır. Kârı maksimize eden örnek çözüm, optimizasyon problemi için optimal çözüm olacaktır. Sezgisel teknikler ya üstün olan ya da daha üstün olan bir çözüme ulaşmak için farklı çözüm modifikasyonlarını gerçekleştiren yöntemlerdir (Oommen ve Rueda, 2005). Yapay zekâ optimizasyon teknikleri, optimizasyon problemlerini çözmek için ümit verici bir tekniktir. Çünkü beynin operasyonlarını taklit edebilmekte ve hesaplama süresini kaydetmek için paralel işlemeyi kullanmaktadır (Shih vd., 2004). Bilgisayar algoritmalarından oluşan bu teknikler en iyi çözüme ulaşmak için var olan çeşitli hamlelerden en iyi sonuç verecek olanı bulmayı hedeflemektedir. Bazı problemlerin pek çoğunun nihai bir çözümü olmadığından ve bu problemlerin çözümü için gerekli olan sürenin gayet büyük olmasından dolayı, araştırmacılar nihai çözüme yakın bir sonuç veren en hızlı algoritmayı bulmaya çalışmışlardır. Sonuç olarak da yapay zekâ optimizasyon teknikleri ortaya çıkmıştır. Bu teknikler kesin çözüm metotları için bir alt veya üst sınır oluşturmaları nedeni ile de önemlidir. Ayrıca kesin bir çözüme ulaşmamakla beraber muhtemel en iyi çözümü bulmayı hedeflemektedirler.

2.3.1. Tabu Arama Algoritması (Tabu Search Algorithm)

1986 yılında Fred Glover tarafından ortaya atılan tabu arama algoritması, yerel arama metotlarının eksikliklerini gidermek üzere oluşturulmuştur. Bazı karmaşık problemlere yerel arama metotları ile en iyi çözümler getirilememektedir. Tabu arama bu tip problemlere en etkili sezgisel çözümü getirmeyi hedeflemektedir. Tabu arama, ilk olası bir noktadan başlayıp bir sonlu dizi oluşturularak optimal bir çözüme ulaşmaya çalışan akıllı bir arama prosedürüdür. Başlangıçta seçilen olası çözüm noktasının komşu alt kümeleri oluşturulur ve bir sonraki nokta en iyi olan çözüm olarak belirlenir. Tabu arama, yükselme hareketlerine izin verdiği için önceki bazı noktalara geri dönüşü önlemek amacıyla tabu hareketleri tabu listesi adı altında listelenir. Çıkış hareketinden dolayı prosedür, yerel optimumdaki tuzakları önler (Kovačević-Vujčić vd., 1999). Kısaca özetlemek gerekirse tabu aramanın çalışma prensibi, yerel optimumla karşılaştığında en iyi olmayan bu çözüme izin vererek yerel arama üzerinden takibe devam etmektir (Gendreau ve Potvin, 2010). Tabu arama algoritması arama yaparken birtakım kısıtlamalar kullanır. Bu sebepten dolayı algoritmaya “tabu” yani “yasaklı arama” denmiştir. Kısıtlamalar ise hafıza yapılarından faydalanılarak oluşturulur (Aladağ, 2009). Bu kısıtlamalar sayesinde normalde kabul edilebilen zor durumlar atlanarak en iyi sonuca ulaşılması sağlanır. Tabu aramada problem çözme işleminin akıllı olarak nitelendirilebilmesi için uyarlanabilir bir hafıza ve duyarlı bir araştırmanın olması gerekir. Bu özellikler ile probleme özel çözümler üretebilme yetisi kazanan tabu arama algoritması, meta-sezgisel bir arama algoritması olarak kabul edilmektedir (Michalska vd., 2016).

2.3.2. Tavlama Benzetimi Algoritması (Simulated Annealing Algorithm)

Olasılık tabanlı sezgisel bir algoritma olan tavlama benzetimi algoritması Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi tarafından oluşturulmuştur. Tavlama benzetimi algoritması mevcut çözüm etrafında rastgele bir varyasyon kullanarak optimizasyon probleminin iyi olan bir çözümünü bulmak için oluşturulan bir tekniktir (Zhao vd., 2013). Katı cisimlerin fiziksel tavlama işlemi esas alınarak oluşturulan bu algoritma, karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Katı cismin erime noktasına kadar ısıtıldıktan sonra cisim kristalize olana kadar yavaş yavaş cismin soğutulması işlemine tavlama denmektedir. Yüksek sıcaklıkta enerji seviyesi de yüksek olan cisimlerin atomları, düzgün yapılı bir kristal haline geçtiği esnada sistemin enerjisi minimum düzeye inmektedir. Sistemin enerjisini düşürmek için de sıcaklık azaltılmaktadır. Bu soğutma işlemi esnasında çok hızlı davranılırsa, cismin kristalize yapısında bozulma gerçekleşmekte ve cismin yapısında düzensizlik oluşmaktadır (Kalinlı, 2003).

Çok değişkenli fonksiyonlarda fonksiyonun en büyük ya da en küçük değerlerinin bulunması amacıyla tasarlanan tavlama benzetimi algoritması en kısa sürede en iyi çözümü bulmaktadır. Bu sebeple matematiksel bir modelle ifade edilemeyen problemlerin optimizasyonunda tercih edilmektedir. Tavlama benzetimi algoritmasında amaç fonksiyon değeri azalma eğilimindedir (Çakır, 2006). Fakat yerel minimuma takılı kalmamak için bazı durumlarda bu fonksiyon da yüksek değerlerde kabul görebilmektedir. Bu şekilde yerel minimuma takılmayıp daha iyi global bir çözüm aranabilmektedir (Kılıçaslan, 2019).

3. Önerilen Metodun Uygulaması (Application of the Proposed Method)

Bu çalışma kapsamında YTA denetleyicisine bağlı olarak akış trafiğinin gözetlenmesi üzerine uygulama geliştirilirken Floodlight VM, Eclipse, MATLAB ve nntool araçlarından yararlanılmıştır. YTA denetleyici yazılımları arasında sürekli gelişmekte olan bir proje olarak dünya çapında yaygınlaşan Floodlight, açık kaynak kodludur ve Java programlama dilini destekleyen bir uygulamadır (Floodlight, 2020). Floodlight projesinin resmi internet

sitesinde yazılımcılar için gerekli tüm adımlar ve kurulumlar ayrıntılı şekilde sunulmaktadır. Önerilen metodun program aşamaları için yine açık kaynak kodlu ve özellikle Java tabanlı yazılımların tasarlandığı Eclipse ortamı kullanılmaktadır. Eclipse, kurulum sırasında Floodlight VM ile entegreli olarak gelmektedir. Aslında bu çalışma sırasında kurulan Floodlight VM içerisinde Floodlight v1.0, Eclipse, Mininet v2.2.0, Open vSwitch v3.2.1, Wireshark w/openflow yazılımları bulunmaktadır. Uygulamada oluşturulan topolojiler Mininet üzerinde Python programlama dili ile oluşturulmaktadır. Floodlight ile karşılıklı işlem yapması için Java platformu olarak tercih edilebilecek farklı bir alternatif örnek IntelliJ IDEA'dır. Bütün bu uygulama ortamlarının yerine farklı denetleyici yazılımları için farklı araçlar kullanılabilir. Örneğin POX denetleyicisi Python programlama dili ile tasarlanmıştır (Yazar, 2013). Aynı şekilde Ryu denetleyicisi de Python temel bilgisini gerektirmektedir. Önerilen çalışmada en uygun denetleyici ve programlama ortamlarına karar verildikten sonra verilerin yapay zekâ tekniklerine dayalı işlemler için kullanımı daha etkin ve kolay olan MATLAB ve nntool tercih edilmiştir.

Uygulamada trafiği gözetlemek için gerekli olan veriler anahtar, port numarası, alınan ve iletilen paketlerin miktarı, bant genişliği, düşmeler, çarpışmalar ve bunların gerçekleştiği saniye (sn) cinsinden süre bilgileridir. Bu verilere Floodlight VM içerisinde bulunan Floodlight projesi sayesinde erişilmektedir. Doğruluğu artırmak adına çeşitli topolojiler üzerinden istatistik verileri elde edilmiştir. Bunun için Mininet ortamında farklı sayıda anahtar ve makinelerden (hostlardan) oluşan beş ayrı topoloji oluşturulmuştur. Oluşturulan topolojilerin her biri 27 sn çalıştırılarak beş ayrı veri seti elde edilmiştir. Sürenin 27 sn seçilmesi ile binlerce satır veri elde edilmiştir ve bu da verilerin işlenmesi sürecinde yeterli görülmüştür. Sürenin artırılması ile veri miktarında aşırı bir artış gerçekleştiği gözlemlendiğinden ve bu da verilerin işlenmesi esnasında problem teşkil edeceğinden 27 sn'lik süre tercih edilmiştir. MATLAB'de matris yapıları üzerine aktarılan verilerin anahtar, port, alınan ve iletilen paket miktarı ve süre sütunları seçilip diğer sütunlar göz ardı edilmiştir. Burada belirtilmesi gereken ayrı bir nokta, YTA'larda veri iletiminin akışlar şeklinde olmasıdır. Bir akış birçok paket içeriğine sahip olduğu için klasik ağ yapılarıyla bağlantılı çalışmalarda kavramsal karışıklıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında Floodlight üzerinden elde edilen veri miktarlarını ifade etmek için klasik bilgisayar ağlarındaki kavram olan "paket miktarı" terimi tercih edilmiştir. Böylece asıl odak noktası, elde edilen veri setleri ve bunların üzerinde yapılacak uygulama işlemleri olmaktadır. Çalışmanın uygulama kısmı için farklılığı oluşturacak etmenler kullanılan algoritmalar ve sonuçların analizindeki yaklaşımdır.

Yapılan çalışmanın uygulama kısmı yapay zekâ üzerine kurulmuştur. Burada amaç belirli bir anda belirli anahtar ve porttan ne kadar paket alınıp iletildiğini tahmin etmeye çalışmaktır. Bu tahmin kısmı ise yapay zekâ yöntemlerinden olan YSA ile gerçekleştirilmiştir. MATLAB aracı olan nntool ile verilerin YSA üzerinde işlenmesi sağlanmıştır. MATLAB matris işlemleri yardımıyla veri setlerinin %80'lik kısmı eğitim, %20'lik kısmı ise test için ayrılmıştır. Veri setlerinin anahtar, port ve süre sütunları girdi verisi olarak, alınan paket ve iletilen paket sütunları ise çıktı verisi olarak ayarlanmıştır. nntool üzerinde gerekli kısımlar seçilerek ağlar oluşturulmuştur. İlk oluşturulan ağ üç girdisi iki çıktısı olan bir ağdır. Fakat elde edilen tahmin başarısı düşük olduğundan ağlar üç girişli bir çıkışlı olmak üzere tasarlanmıştır. Böylece her bir topoloji için alınan paket ve iletilen paketlere göre ayrı ağlar oluşturulmuştur. Çok karmaşık veri setlerine sahip olunmadığından on nöronluk iki katmanlı YSA yeterli olmuştur. Beş farklı topoloji için oluşturulan YSA'ların belirli anlardaki tahminlerinin doğruluğu kıyaslanmıştır. Doğruluklar ise MAPE (Mean Absolute Percentage Error) ve R² (R-squared) fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır.

Uygulamanın son kısmı ise optimizasyondan oluşmaktadır. Optimize edilecek problem, yani optimum sonuç olarak elde edilmek istenen değer, topolojide hangi güzergâhta en fazla yoğunluğun olduğudur. Bunun için dört farklı yöntemle optimizasyon gerçekleştirilmiş ve bunların sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunlardan ilki geleneksel arama metodu olan doğrusal arama, ikincisi tabu arama, üçüncüsü değiştirilmiş tabu arama, dördüncüsü ise tavlama benzetimi ile tabu arama algoritmalarının karışımıdır (bundan sonrasında karışım algoritması olarak isimlendirilecektir). Son iki yöntem ilk kez bu çalışma çerçevesinde ortaya çıkarılan metotlardır. Bu dört farklı optimizasyon yöntemi sonucunda paket trafiğinin en yoğun olduğu güzergâh tespit edilmiştir. Bu aşamada kullanılan algoritmaların tercihi için önemli olan kriterler fonksiyonel olarak ağ problemine uyarlanabilmeleri, yani ağ üzerindeki bölgelerde yoğunluğun bulunmasını birbirleriyle uyumlu şekilde kıyaslayabilmeleri ve hızlı olmalarıdır. Bu çalışmada optimizasyon adımıyla oluşturulan işlem, problemin doğru çözümüne gitmek için en kısa sürenin ön plana alınmasıdır. Bu amaçla en uygun metotların bulunmasına çalışılmıştır. Önceki farklı bir ağ çalışmasında (Yıltaş, 2007) evrimsel algoritmalar arasında yer alan genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik algoritma özellikle yönlendirme (rotalama), atama veya yerleştirme tabanlı optimizasyon problemleri için elverişli bir yöntemdir ve bu konuda Ünsal ve Yiğit (2018) ile Yiğit ve Aydemir (2018)'in çözümleri gibi literatürde başka örnekler de vardır. Ancak genetik algoritmada yer alan yeni jenerasyon oluşturma, çaprazlama, mutasyon gibi aşamalar, bu çalışmanın temel amacı olan yoğun ağ bölgelerinin kısa sürede tespiti konusuyla bağdaşmamaktadır. Bu çalışma içerisinde oluşturulan programlar aracılığıyla amaca uygun ve hızlı işlemler yapabildiği görülen tabu arama ve tavlama benzetimi algoritmaları ele alınarak yeni ek iki model (değiştirilmiş tabu algoritması ve karışım algoritması) önerilmiş, bunların doğrusal arama algoritması ile karşılaştırılmaları

planlanmıştır.

Değiştirilmiş tabu arama algoritması, tabu arama algoritmasından tabu listesi çıkartılarak elde edilmiştir. Tabu arama algoritması incelendiğinde tabu listesinin bu problem için gereksiz olduğu ve optimizasyonu yavaşlattığı gözlemlenmiştir. Liste algoritmadan çıkarıldığında performansta artış gözlemlenmiştir. Buradan da yapay zekâ optimizasyon tekniklerinin her ne kadar elverişli olsalar da probleme özgü olmalarından dolayı her zaman başarı gösteremedikleri gözlemlenmiştir. Başka bir problemde, örneğin gezgin satıcı probleminde, gayet elverişli olan bu algoritma, mevcut çalışmadaki problemde performans düşüklüğüne sebebiyet vermektedir.

Son yöntem olan karışım algoritmasının ilk kısmı tabu arama algoritmasından gelmektedir. Tavlama benzetimi algoritmasında rastgele seçilen başlangıç çözümünün yerine, tabu arama algoritmasındaki ilk değeri başlangıç çözümü olarak atama durumu tercih edilmiştir. Daha sonraki kısımlarda tabu aramaya yer verilmemiştir. Geri kalan kısımda komşu çözümler oluşturulmuş olup amaç fonksiyonundaki yani toplam paket değerindeki değişim gözlemlenmiştir. Ek olarak bu kısımda da bir değişikliğe gidilmiştir. Normalde amaç fonksiyonunda azalma söz konusu ise çözüm mevcut çözüm olurken bu algoritmada tam tersi göz önünde bulundurulmuştur. Yani amaç fonksiyonunda artış olduğu takdirde çözüm mevcut çözüm olmaktadır. Çünkü problemin temelinde ağdaki bölge yoğunlukları, yani paket akışının fazlalığı gözlemlenmektedir.

Uygulama kısmında yer alan işlem elemanlarının birbirleriyle bağlantısı Şekil 2’de özet olarak görülmektedir.



Şekil 2. Uygulama İşlemleri (Application Operations)

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu bölümdeki sonuçlar Intel Core i7-7700HQ CPU 2.80GHz, 16 GB RAM, Windows 10/ 64 bit işletim sistemine sahip bir dizüstü bilgisayar üzerinde hazırlanan programlar aracılığıyla elde edilmiştir. Yapılan çalışma birbirine bağlı üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım YTA sayesinde ağ topolojileri hakkındaki istatistik verilerini elde etmek, ikinci kısım elde edilen bu veriler ışığında YSA kullanılarak belirli bir andaki paket trafiğini tahmin etmek ve son olarak üçüncü kısım ise YSA sonuçlarına göre doğruluğu en yüksek olan topoloji üzerinde trafik yoğunluğunu optimize etmek olarak planlanmıştır.

İlk kısım olan YTA tarafında Python yardımıyla elde edilen beş farklı topoloji uygulama üzerinde çalıştırılarak denetleyicinin işlerliği gözlemlenmiştir. Tablo 1’de bu topolojilere ait bilgiler yer almaktadır. Denetleyicinin farklı türde topolojiler üzerinde etkin bir biçimde çalıştığı tespit edilmiştir. İlk kısım sonucunda beş ayrı veri seti elde edilmiştir.

Tablo 1. Python yardımıyla oluşturulan beş ayrı topolojiye ait bilgiler (Information about five separate topologies created by Python)

Topoloji Türü	Anahtar	Makine
Doğrusal	45	45
Ağaç	9	64
Dairesel	10	36
Dairesel	20	57
Dairesel	30	87

İkinci kısım olan yapay zekâ tarafında YSA kullanılarak bir tahmin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Buradaki temel hedef, belirli bir zamanda belirli anahtar ve port üzerinden alınıp iletilen paket miktarını tahmin etmektir. Şekil 3’te uygulamanın tahmin kısmının çalışmasından bir kesit yer almaktadır.

	Alınan Paket Miktarı	İletilen Paket Miktarı
Alınan Paket Miktarı	8	969.481
MAPE DEĞERİ:	0.0216274	0.00941536
R ² DEĞERİ:	0.975839	0.998528

Belirli bir anda ağ trafiğinde en fazla yoğunluğun(alınan paket miktar) yaşandığı switch ve ona ait olan port bilgisi(391-419 sn arası)

Şekil 3. Alınan ve iletilen paket miktarlarına göre yapılan tahmin ve doğruluk oranları (Estimation and accuracy rates based on the received and transmitted packet amounts)

Yapılan tahminlerin doğruluk oranları MAPE ve R^2 fonksiyonlarına göre ölçülmüştür. MAPE fonksiyonu ortalama mutlak yüzde hatası anlamına gelmektedir ve Eşitlik (1)'de hesaplanmaktadır.

$$MAPE = \frac{100 \times \sum \left| \frac{(p_i - a_i)}{a_i} \right|}{n} \quad (1)$$

Burada a değeri belirli bir gözlemdaki gerçek değeri, p bu gözlem için modelin tahmin ettiği değeri ve n ise gözlemlenen durumların sayısını ifade etmektedir.

MAPE fonksiyonu hatanın artış veya azalış yönünde olmasıyla ilgilenmeyip sadece sapma miktarını hesaplamaktadır. Bu sebeple hatanın mutlak değeri alınmaktadır. MAPE fonksiyonuna göre elde edilen değer küçük olması gerçek değerden sapma miktarının az olacağı anlamına gelmektedir.

R^2 ise değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığını ölçmemize olanak tanımaktadır. Fonksiyonun değeri 0 ile 1 arasındadır. Eğer sonuç sıfıra yakın çıkarsa sonuç doğruluktan uzaklaşmış, bire yakın çıkarsa tahminin doğru olma olasılığı yüksek demektir. YSA'larda kullanılan R^2 Eşitlik (2) ve Eşitlik (3)'ten yola çıkarak Eşitlik (4)'te olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$SSt = \sum_{i=1}^n (y_i - \text{ort}(y_i))^2 \quad (2)$$

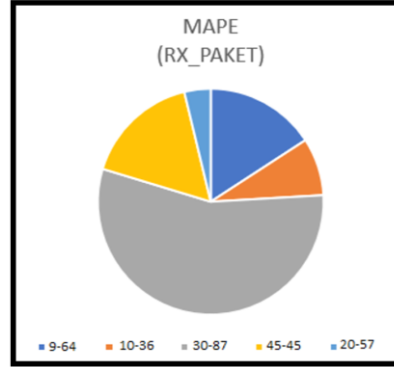
$$SSe = \sum_{i=1}^n (N_i - y_i)^2 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - SSe/SSt \quad (4)$$

Temelde SSt gerçekleşmedeki sapmayı, SSe de hatalardaki sapmayı hesap etmektedir. Burada y_i gerçek hayatta olması gereken sonucu, ort ortalamayı, N_i YSA'nın elde ettiği sonucu, n ise önceden bahsedildiği gibi gözlemlenen durumların sayısını belirtmektedir.

Uygulamadaki topolojilerin MAPE ve R^2 fonksiyonları baz alınarak alınan ve iletilen paket miktarları için doğruluk değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bütün topolojiler için bu değerlerle ilgili ölçüm sonuçları Değirmenci (2018) tarafından hazırlanan tezde yer almaktadır. Örnek olması açısından alınan paket miktarlarına göre bulunan MAPE

ölçümleri Şekil 4'te grafiksel olarak gösterilmektedir. Tablo 1'deki değerler referans alınarak şekildeki ilk sayısal değerler anahtar sayısını, ikinci sayısal değerler ise makine sayısını ifade etmektedir. Alınan ve iletilen paket miktarlarının ikisi de gözlemlendiğinde ortaya çıkan sonuçlara göre tahmin başarısı en yüksek olan topolojinin 20 anahtar ve 57 makineden oluşan dairesel topoloji olduğu gözlemlenmiştir. Bu topoloji her iki veri miktarı için de en küçük MAPE fonksiyon değerini ve 1'e çok yakın bir R^2 değerini üretmiştir. Doğruluğu en yüksek ikinci topolojinin ise ağaç topolojisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. Alınan paket miktarına göre yapılan tahminlerin doğruluk oranları (Accuracy of estimates based on the received packet amount)

Üçüncü ve son olan kısım ise optimizasyon işlemlerinden oluşmaktadır. Şekil 5'te uygulamanın bu tarafındaki çalışmaya ait görüntü yer almaktadır.

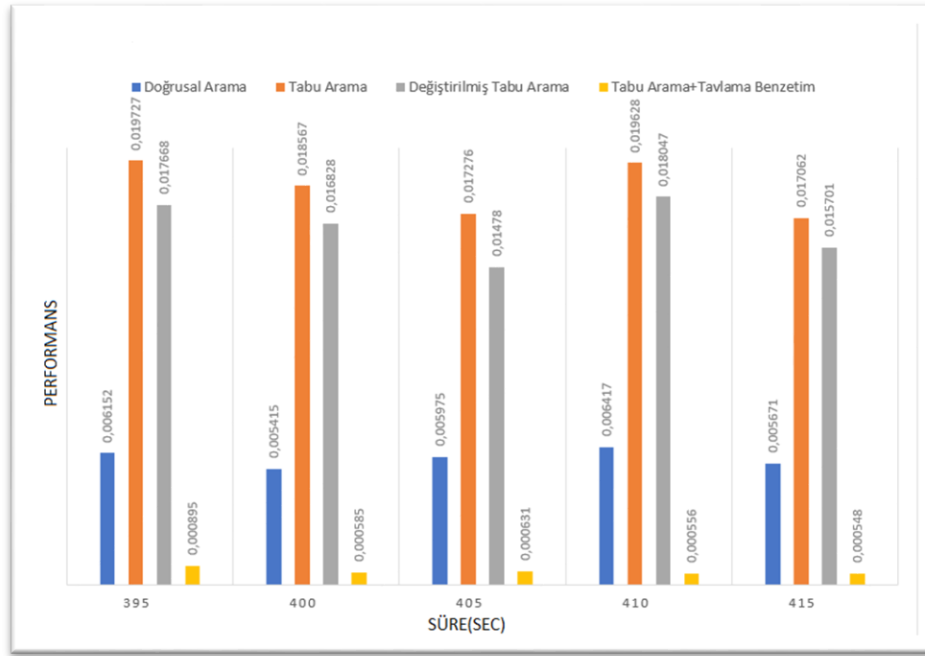
Şekil 5. 398. sn'de ağda en fazla paket akışının olduğu güzergâhın bulunması (Finding the route with the maximum number of packet streams in the network at 398th second)

Bu aşamada ise ikinci kısımda yapılan tahmin işleminin doğruluk oranına göre seçilen en iyi iki topoloji üzerinde paket yoğunluğu en fazla olan güzergâhı bulma problemi optimize edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda dört ayrı optimizasyon yöntemi denenmiştir ve bunların performansları kıyaslanmıştır. Bu yöntemler önceden belirtildiği gibi tabu arama, doğrusal arama, değiştirilmiş tabu arama ve karışım algoritmasıdır. Bu algoritmalar farklı zamanlarda çalıştırılarak tek bir ana bağlı kalınmamış olup farklı zamanlardaki sonuçlarla doğruluk oranı artırılmak istenmiştir. Bunun için astgele seçilen 395. sn'deki sonuçlara ek olarak beşer saniye aralıklarla algoritmaların ürettiği sonuçlar gözlemlenmiştir. Böylelikle 395., 400., 405., 410. ve 415. sn'lerde algoritmaların ürettiği sonuçlar kıyaslanmıştır. Farklı zamanlarda elde edilen performans değerleri Tablo 2'de yer almaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde beş farklı zaman diliminde de en başarılı performansın daima karışım algoritmasında olduğu gözlemlenmiştir. Performans değerleri grafiksel olarak Şekil 6'daki gibidir. Yöntemlerin

işlerliğini test etmek açısından en iyi ikinci doğruluğa sahip olan ağaç topolojisinde de bu fonksiyonlar denenmiştir. Sonuç olarak yine en iyi performansın karışım algoritmasına ait olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. 20 anahtar ve 57 makineden oluşan topolojiye ait optimizasyon performansı (Optimization performance for the topology of 20 switches and 57 hosts)

Süre	Doğrusal Arama (Geleneksel arama metodu)	Tabu Arama (Yapay zekâ optimizasyon teknîği)	Değiştirilmiş Tabu Arama	Karışım (Tavlama Benzetimi ve Tabu Arama)
395. sn	0,006152	0,019727	0,017668	0,000895
400. sn	0,005415	0,018567	0,016828	0,000585
405. sn	0,005975	0,017276	0,014780	0,000631
410. sn	0,006417	0,019628	0,018047	0,000556
415. sn	0,005671	0,017062	0,015701	0,000548



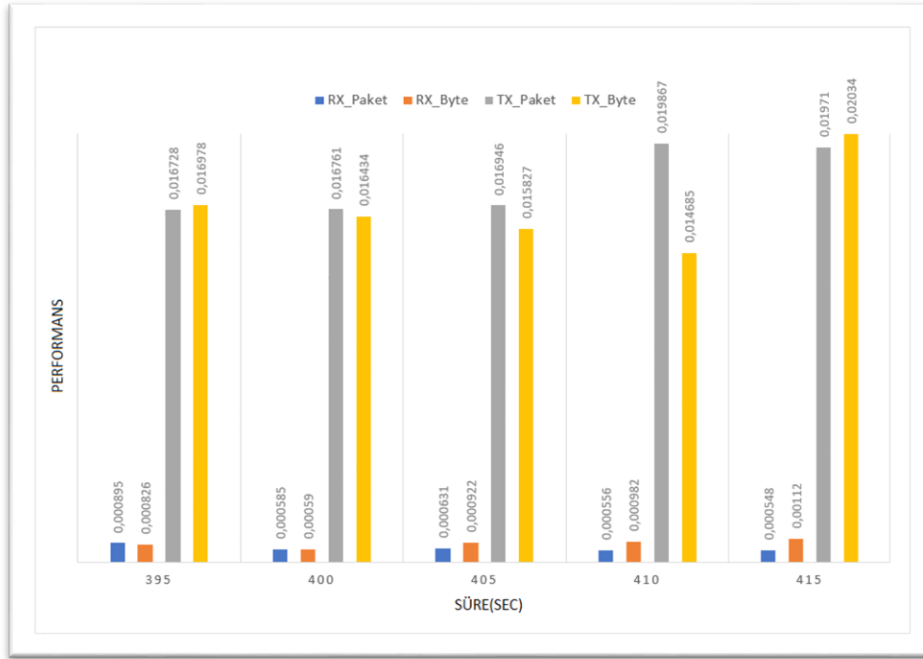
Şekil 6. 20 anahtar ve 57 makineden oluşan daire (halka) topolojisine ait dört ayrı optimizasyon tekniğine göre hesaplanmış performans grafiği (Performance chart computed according to four different optimization techniques of ring topology consisting of 20 switches and 57 hosts)

Alınan paket miktarı (RX_PAKET) göz önünde bulundurularak yapılan optimizasyon işlemlerinin sonucunda karışım algoritmasının en iyi performansı sergileyen algoritma olduğu görüldükten sonra bu algoritma üzerinde farklı değerler ile denemeler yapılmış ve ilgili performans değerleri incelenmiştir. Şöyle ki portlar arasında RX_PAKET'e göre yoğunluğun yani RX_PAKET toplam değerinin en fazla olduğu güzergâh tespit edilmiştir. Diğer denemelerde ise portlar arasında iletilen paket miktarına (TX_PAKET), alınan bayt miktarına (RX_BYTE) ve iletilen bayt miktarına (TX_BYTE) göre de yoğunluğun en fazla olduğu güzergâhlar tespit edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu denemeler karışım algoritması üzerinden beş farklı zamanda gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonucunda elde edilen değerler Tablo 3'te yer almaktadır. Yapılan denemeler sonucunda güzergâhların ve performansların değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise RX_PAKET ve TX_PAKET üzerinde yapılan denemeler baz alındığında porta gelen ve porttan çıkan paket miktarının farklılık göstermesidir. Diğer bir senaryo olarak RX_PAKET ve RX_BYTE miktarlarına göre yapılan denemeler sonucunda farklı güzergâhlar ve farklı performans sonucu elde edilmesinin sebebi ise her bir paketin taşıdığı bilginin bayt cinsinden aynı büyüklükte olmamasıdır.

Optimizasyondaki amaç problemin çözümüne giden en doğru yolu en kısa sürede gitmektir. Bu doğrultuda dört ayrı kritere göre hesaplanmış optimizasyon performans değerlerinden en iyi performansın Şekil 7'de gösterildiği gibi RX_PAKET'e göre yapılan optimizasyon işleminden olduğu görülmektedir.

Tablo 3. 20 anahtar ve 57 makineden oluşan daire topolojisine ait dört ayrı kritere göre hesaplanmış optimizasyon performans değerleri (Optimization performance values based on four different criteria of circle topology consisting of 20 switches and 57 hosts)

Süre	RX_PAKET	RX_BYTE	TX_PAKET	TX_BYTE
395. sn	0,000895	0,000826	0,016728	0,016978
400. sn	0,000585	0,000590	0,016761	0,016434
405. sn	0,000631	0,000922	0,016946	0,015827
410. sn	0,000556	0,000982	0,019867	0,014685
415. sn	0,000548	0,001120	0,019710	0,020340



Şekil 7. 20 anahtar ve 57 makineden oluşan daire topolojisine ait dört ayrı kritere göre hesaplanmış optimizasyon performans grafiği (Optimization performance graph based on four different criteria of ring topology consisting of 20 switches and 57 hosts)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Büyük ağ topolojilerinde yer alan anlamlı ve değerli verinin geleneksel ağ yöntemleriyle ölçülmesi oldukça güçtür. Bu çalışmada YTA sayesinde yazılımlar aracılığıyla bu verilerin elde edilmesi ve işlenmesi üzerine bir uygulama yapılmıştır. YTA uygulamalarının klasik ağ yapılarına göre en temel farkı kullanılan denetleyici yazılımı ile fiziksel ağ cihazlarının birbirinden ayrılmasından dolayı programlar aracılığıyla işlem kontrollerinin etkin yapılabilmesidir. Ayrıca klasik ağlar üzerindeki paket iletimi kısmı YTA'da akış şeklinde gerçekleşmektedir. Yani ağ içinde birden çok düğüme paket iletimi gerçekleştiği için bu da yoğun bir akış trafiğine sebebiyet vermektedir. Bu esnada YTA denetleyicisi olarak Floodlight kullanılarak ağ akış bilgileri elde edilmiştir. Bu bilgiler uygulamada veri seti olarak kullanılmıştır. En yoğun paket trafiğinin yaşandığı güzergâh RX_PAKET, TX_PAKET, RX_BYTE ve TX_BYTE metriklerine göre ayrı ayrı bulunmuştur. Yapay zekâ optimizasyon teknikleri bu dört kriterin her birine ayrı ayrı uygulanarak en yoğun trafiğin yaşandığı güzergâh başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Kriterlere göre elde edilen sonuçlar incelendiğinde RX_PAKET'e göre yapılan işlemlerin performans açısından daha başarılı olduğu görülmüştür. Optimizasyon kısmında ise dört farklı teknik kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu tekniklerden birisi doğrusal arama metodu yani geleneksel yöntem iken geri kalanlar yapay zekâ optimizasyon tekniklerinden olan tabu arama ve tavlama benzetimi algoritmaları ve bunların önerilen türevleridir. Sonuçlar incelendiğinde geleneksel arama metodunun tabu arama metodundan daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Buradan da yapay zekâ optimizasyon tekniklerinin her problem için en iyi çözüm olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Öte yandan bu çalışmada önerilen iki yöntemden biri olan karışım algoritması doğrusal arama metodundan daha iyi bir performans sergilemiştir. Böylece son aşama için karışım algoritmasıyla tümleşik olan YSA modeli kullanılarak ağın belirli bir anında yaşadığı paket trafik yoğunluğu tahmin edilmiştir. Bu kısım ise RX_PAKET, TX_PAKET, RX_BYTE ve TX_BYTE değerleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Tahminler neticesinde yüksek doğruluk elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışma geliştirilmeye elverişlidir. Şöyle ki; ileri aşamalarda yoğunluğu tespit edilen güzergâh üzerinde YTA'lar kullanılarak trafik yoğunluğunu azaltma gerçekleştirilebilir. Diğer bir fikir ise farklı optimizasyon teknikleri ile bu çalışmadaki teknikleri kıyaslamaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abu Salam, Z. K. A., Keskin, M. E., 2018. Yapay Sinir Ağları ile Dibis Barajı'nın Seviye Tahmini. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 564-569.
- Aladağ, Ç. H., 2009. Yapay Sinir Ağlarının Mimari Seçimi İçin Tabu Arama Algoritması. Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye.
- Çakır, B., 2006. Stokastik İşlem Zamanlı Montaj Hattı Dengeleme İçin Tavlama Benzetimi Algoritması. Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Değirmenci, Ş., 2018. Yazılım Tanımlı Ağ Denetleyicisine Bağlı Paket Trafik Gözetleme Uygulaması ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Floodlight. Project Floodlight-Floodlight Controller-Installation Guide, [Online]. Available: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/floodlightcontroller/pages/1343544/Installation+Guide#InstallationGuide-Linux>.
- Gendreau, M., Potvin, J.-Y., 2010. *Handbook of Metaheuristics*, 2nd ed. Springer Science+Business Media.
- Haykin, S., 2009. *Neural Networks and Learning Machines*, Third ed. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc., [Online]. Available: <http://dai.fmph.uniba.sk/courses/NN/haykin.neural-networks.3ed.2009.pdf>.
- Kalınlı, A., 2003. Elman Ağının Benzetilmiş Tavlama Algoritması Kullanarak Eğitilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 28-37.
- Kılıçaslan, K. Isıl İşlem Algoritması (Simulated Annealing), [Online]. Available: <ders.kilicaslan.nom.tr/doc/19/52/Isil%20İşlem%20Algoritması.docx>
- Kovačević-Vujčić, V. V., Čangalović, M. M., Ašić, M. D., Ivanović, L., Dražić, M., 1999. Tabu Search Methodology in Global Optimization. *Computers & Mathematics with Applications*, 37, 125-133.
- Kutay, M., Ercan, T., 2016. An Overview of Software Defined Campus Networks. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 155-164.
- Michalska, M., Zufferey, N., Mattevelli, M., 2016. Tabu Search For Partitioning Dynamic Dataflow Programs. *The International Conference on Computational Science, Procedia Computer Science*, 80, 1577-1588.
- Mourrain, B., Pavlidis, N. G., Tasoulis, D. K., Vrahatis, M. N., 2006. Determining the Number of Real Roots of Polynomials Through Neural Networks. *Computers & Mathematics with Applications*, 51(3-4), 527-536.
- Niyaz, Q., Sun, W., Alam, M., 2015. Impact on SDN Powered Network Services Under Adversarial Attacks. *The 2015 International Conference on Soft Computing and Software Engineering (SCSE 2015), Procedia Computer Science*, 62, 228 - 235.
- Oommen, B. J., Rueda, L. G., 2005. A Formal Analysis of Why Heuristic Functions Work. *Artificial Intelligence*, 164, 1-22.
- Sezer, S., Scott-Hayward, S., Chouhan, P. K., Fraser, B., Lake, D., Finnegan, J., Viljoen, N., Miller, M., Rao, N., 2013. Are We Ready for SDN? Implementation Challenges for Software-Defined Networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(7), 36-43.
- Shih, H. S., Wen, U. P., Lee, E. S., Lan, K. M., Hsiao, H. C., 2004. A Neural Network Approach to Multiobjective and Multilevel Programming Problems. *Computers & Mathematics with Applications*, 48, 95-108.
- Staub, S., Karaman, E., Kaya, S., Karapınar, H., Güven, E., 2015. Artificial Neural Network and Agility. *World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship, Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1477 - 1485.
- Taşhan, B., 2017. Road Lane Detection System With Convolutional Neural Network. Master's Thesis. Bahçeşehir University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Computer Engineering, İstanbul, Turkey.
- Ünsal, Ö., Yiğit, T., 2018. Optimization of School Bus Routing Problem by Using a Method with Artificial Intelligence and Clustering Techniques, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(1), 7-20.
- Xia, W., Wen, Y., Foh, C. H., Niyato, D., Xie, H., 2015. A Survey on Software-Defined Networking. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 17(1), 27-51.
- Yazar, S., 2013. Ağ Anahtarlarında OpenFlow Protokolü ve Pox Denetleyicisi Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, Türkiye.
- Yıltaş, D., 2007. Alçak Yörüngedeki Uydu Sistemlerinde Yeni Bir Yönlendirme Algoritmasının Tasarımı. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Yiğit, T., Aydemir, M., 2018. Container Loading Problem Optimization By Using Genetic Algorithm Without Rotating The Package, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(1), 21-28.
- Zhao, X., Lin, W., Yu, C., Chen, J., Wang, S., 2013. A New Hybrid Differential Evolution with Simulated Annealing and Self-Adaptive Immune Operation.



DERİN ÖĞRENME KULLANILARAK OPTİMUM JPEG KALİTE FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ

Emir ÖZTÜRK*, Altan MESUT

Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Veri Sıkıştırma, Derin Öğrenme, CNN, JPEG.</i>	Görüntü verisinde sıkıştırma algoritmalarının kullanılması bir gereklilik haline gelmiştir. En çok kullanılan görüntü sıkıştırma algoritmalarından biri olan JPEG, görüntü üzerinde kayıplı bir sıkıştırma gerçekleştirmekte ve verilen kalite faktörüne göre bu kayıp değişmektedir. Düşük kalite faktörlerinde dosya boyutu küçülmekte fakat bozulma gözle görülür hale gelmektedir. Yüksek kalite faktörlerinde ise kalite artmakta fakat dosya boyutundan edilen sıkıştırma karı azalmaktadır. Bu sebeple hem görüntü kalitesini korumak hem de yer kazancı sağlamak için dosya boyutu ve görüntü kalitesi arasındaki dengenin sağlanması faydalı olacaktır. Bu çalışmanın amacı, dosya boyutu ve görüntüdeki bozulmanın arasındaki oranın en iyi (optimum) olduğu kalite faktörünü derin öğrenme yöntemleri kullanarak belirlemektir. Yapılan çalışmada önerilen bir veri çıkarma yöntemi yoğun sinir ağları (dense neural networks) ile eğitilmiş ve yöntemin başarısı evrimsel sinir ağları ile yapılan denemelerle karşılaştırılmıştır. Görüntüdeki bozulmanın hesaplanmasında SSIM (Structural Similarity Index) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda önerilen yöntem kalite faktörünün belirlenmesinde CNN kullanılmasına göre %9.36 daha fazla doğruluk oranına sahip olmuştur.

FINDING THE OPTIMUM JPEG QUALITY FACTOR USING DEEP LEARNING

Keywords	Abstract
<i>Data Compression, Deep Learning, CNN, JPEG.</i>	It has become a necessity to use compression algorithms in image data. One of the most used image compression algorithms, JPEG performs lossy compression on an image and the loss varies according to the given quality factor. At low quality factor values, the file size gets smaller and artifacts become noticeable. In high quality factors, quality of image increases but savings from storage space decreases. For this reason, it will be beneficial to balance the file size and image quality in order to both maintain image quality and save space. The aim of this study is to determine the quality factor value, where the ratio between file size and image distortion is optimum, by using deep learning methods. In the study, a proposed data extraction method was trained with dense neural networks and the success of the method is compared with experimental results obtained with convolutional neural networks. Calculation of image distortion was carried out using SSIM (Structural Similarity Index). In the results obtained, the proposed method has 9.36% more accuracy than CNN in determining the quality factor.

Alıntı / Cite

Öztürk, E., Mesut, A., (2020). Derin Öğrenme Kullanılarak Optimum JPEG Kalite Faktörünün Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1010-1018.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Öztürk, 0000-0002-3734-5171
A. Mesut, 0000-0002-1477-3093

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	04.03.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.11.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: emirozturk@trakya.edu.tr, +90-284-226-1218-1101

1. Giriş (Introduction)

Yüksek çözünürlüklü kameraların ve cep telefonlarının yaygınlaşması ile üretilen ve internet üzerinde saklanan görüntü verisinin boyutu ve çözünürlüğü her geçen gün artmaktadır. Çözünürlüğün ve boyutun artması ile ihtiyaç duyulan kapasite de artış göstermektedir. Bu nedenle mevcut veriyi daha az yere ihtiyaç duyarak saklamak amacıyla sıkıştırma algoritmaları kullanılmaktadır. Görüntü verisinin sıkıştırılmasında JPEG (Wallace, 1992), JPEG2000 (Skodras vd., 2001), JPEG XR (Dufaux ve Sullivan, 2009), JPEG XT (Artusi vd., 2016) ve PNG (Randers-Pehrson ve Boutell, 1999) gibi kayıplı ve kayıpsız algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır.

Kayıpsız sıkıştırma algoritmaları verideki tekrarı azaltmak gibi yöntemler ile yer kazancı sağlarken, kayıplı sıkıştırma algoritmaları ise verinin belirli bir kısmını geri dönülmez bir şekilde eleyerek dosya boyutunu küçültmektedir. Bu sebeple kayıplı algoritmalar, kayıpsız sıkıştırma algoritmalarına göre daha fazla yer kazancı sağlamaktadır. Buna karşılık olarak sıkıştırılan görüntü üzerinde bozulmalar görülmektedir.

Kayıplı sıkıştırma algoritmalarının görüntü üzerinde sebep olduğu bozulmaların ölçülmesinde MSE (mean square error), PSNR (peak signal to noise ratio), SSIM (structural similarity index) (Z. Wang vd., 2004) gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir.

Kayıplı görüntü sıkıştırma algoritmalarından olan JPEG, DCT kullanarak görüntüdeki yüksek frekans değerlerini çıkartır ve bu sayede görüntü üzerinde sıkıştırma sağlar. Elenecek yüksek frekans değerlerinin oranı ise kalite faktörü (QF) değeri ile belirlenmektedir. JPEG için bu değer 0 ile 100 arasında bir tamsayıyı ifade etmektedir. Yüksek kalite faktörlerinde elenen veri miktarı daha az olduğundan görüntü kalitesi daha yüksek ve sıkıştırmadan elde edilen kazanç daha düşük olmaktadır. Düşük kalite faktörlerinde ise dosya boyutu oldukça küçülmemekte fakat bozulma gözle görülür bir şekilde artmaktadır. Farklı karmaşıklıkta görüntü dosyalarında verilen kalite faktörüne göre elde edilen bozulma ve dosya boyutu da farklılık göstermektedir.

Farklı boyutta ve karmaşıklıkta görüntü dosyaları için bozulma ve dosya boyutu arasındaki denge farklı kalite faktörlerinde sağlanmaktadır. Düşük karmaşıklığa sahip görüntülerde kalite faktörünün düşürülmesi görüntü üzerinde daha az bozulmaya sebep olmakta ve dosya boyutunu daha fazla küçültebilmektedir. Bu sebeple bu tarz görüntüler için düşük kalite faktörleri daha uygun olmaktadır. Yüksek karmaşıklığa sahip görüntülerde ise belli bir değerden sonra kalite faktörünün artması ile dosya boyutu artarken bozulma oranında büyük değişimler görülmemektedir. Uygun kalite faktörünün seçilmesi, dosyanın bozulma ve boyut arasındaki optimum dengesini sağlamaktadır. Bu sayede görüntü kalitesinden fazla ödün vermeden elde edilebilecek en iyi sıkıştırma sağlanabilmektedir.

Elde edilen verilerin analiz edilebilmesi ve bir sonraki aşamada bu verilerden çıkarım ve tahmin yapılabilmesi için makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi algoritmalarının başarılı olduğu birçok farklı alan bulunmaktadır. Örneğin sosyal medya üzerinde gerçekleştirilen duygu analizi işleminde SVM (Support vector machine), KNN (K Nearest Neighbours), Random Forest, lojistik regresyon gibi algoritmaların başarısı ölçülmüş ve lojistik regresyon, %70 oranında başarı göstermiştir (Çelik vd., 2020). Bir diğer çalışmada ise kullanıcı taleplerine verilen cevap süresi tahmini SVM ile gerçekleştirilmiş ve %99 eğitim başarısı elde edilmiştir (Çevik ve Kayakuş, 2020).

Büyük veri setlerinin farklı uygulamalar için eğitilmesinde ise yapay sinir ağları ve derin öğrenme algoritmaları kullanılabilir. İnsan beyninin çalışma mekanizmasından esinlenerek ortaya atılmış bir yöntem olan yapay sinir ağlarının bir türü olan derin öğrenme algoritmalarının kullanılması görüntü, ses veya doğal dil işleme gibi alanlarda büyük başarı sağlamıştır (Masters ve Luschi, 2018). Özellikle 2000'li yıllardan sonra donanımdaki gelişmeler ve grafik işlemcilerinin kullanılabilmesi ile derin öğrenme algoritmalarının kullanımı artmış ve bugünkü seviyeye gelmiştir. Makine öğrenmesinde olduğu gibi derin öğrenme algoritmalarında da oldukça yüksek başarı sonuçları elde edilebilmektedir. Örneğin, (Baştürk vd., 2018) yaptıkları çalışmada derin öğrenme algoritmalarının parmak izi tanıma konusunda başarısının SVM, KNN veya Naive Bayes gibi yöntemlere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Yine yapılan bir diğer çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen sistem tasarımında %85 başarı elde edilmiştir (Işık ve Işık, 2020).

Derin öğrenme algoritmalarının bir çeşidi olan evrimsel sinir ağları (CNN) görüntü verisi üzerinde oldukça başarılı sonuçlar elde etmektedir (Cengil ve Çınar, 2016). (Rende vd., 2016) yaptıkları çalışmada derin öğrenme algoritmalarında model seçimi için bir test otomasyonu geliştirmiş ve CNN kullanarak görüntüleri sınıflandırmıştır. Yapılan çalışmada %99'a varan başarı sonuçları elde edilmiştir.

Görüntülerin mevcut özelliklerine göre kalite faktörünün etkili bir şekilde belirlenmesi için veri seti boyutunun önemi büyüktür. Veri setinin boyutunun eğitim başarısına olumsuz etkileri yapılan çalışmalarda irdelenmiştir.

(Pinto vd., 2008; Gonzalez, 2007). Çalışmalarda sunulan sonuçlarda veri setinin iki katına çıkarılması ile incelenen eğitim modellerinin birçoğunda başarı oranları %20'ye kadar artış göstermiştir.

Bu çalışmada görüntü kalitesinin veya sıkıştırma oranının önemine göre bir kalite faktörü seçimi amaçlanmıştır. Bu sayede kullanıcıların önem verdiği duruma göre optimum bir kalite faktörü belirlenmesi işlemi gerçekleştirilecektir. Kullanıcının kaliteye ağırlık vermesi durumunda dosya boyutu daha büyük olacak şekilde, daha kaliteli görüntülerin elde edilmesini sağlayacak yüksek kalite faktörlerinin seçimi gerçekleştirilecektir. Aksi takdirde görüntüdeki bozulmanın kabul edilebilir düzeyde olduğu seçilebilecek en düşük kalite faktörünün seçilmesi ve dosya boyutunun olabildiğinde küçük tutulması amaçlanmaktadır.

İstenilen modelin oluşturulması için çalışmada "The Open Images Dataset v4" (Kuznetsova vd., 2018) derleminin 110 GB boyutunda bir kısmı üzerinde 10-100 arasında olmak üzere 10 farklı kalite faktöründe dosya boyutları ve bozulma oranları elde edilmiştir. Kalite faktöründeki küçük farklar sonuçta değişiklik göstermemektedir. Bu sebeple kalite faktörleri arasındaki aralık 10 olarak belirlenmiştir. Daha sonra görüntüler bu 10 farklı sınıfta etiketlenmiştir. Elde edilen bu etiketli veri CNN ve makalede önerilen bir yöntem kullanılarak eğitilmiş ve kalite faktörü tahminindeki başarıları karşılaştırılmıştır

Çalışmanın ikinci bölümünde CNN mimarisi açıklanmış ve kullanılan model verilmiş, üçüncü bölümde önerilen yöntem sunulmuştur. Dördüncü bölümde sınıflandırma verisinin elde edilmesinde kullanılan yöntem açıklanmıştır. Beşinci bölümde elde edilen test sonuçları incelenmiş ve son bölümde değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

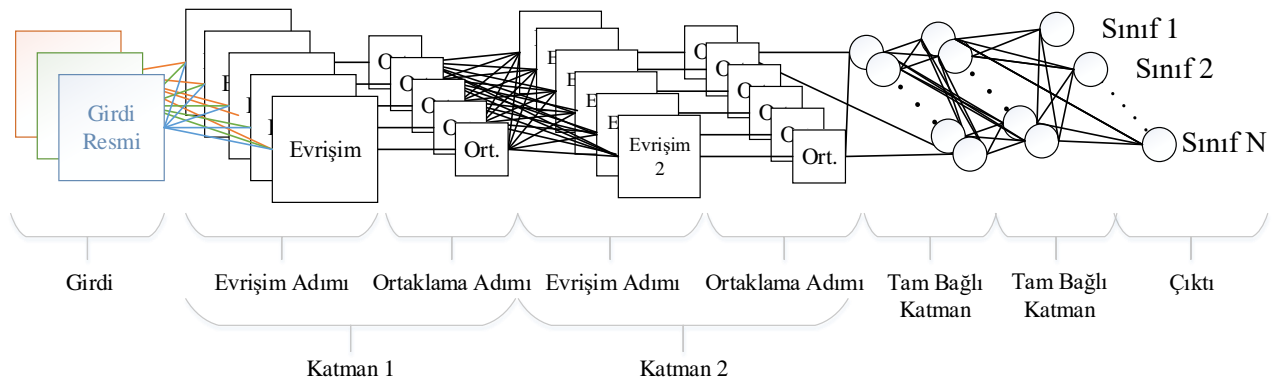
2. Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks)

Evrişimsel sinir ağları (Convolutional neural networks - CNN) çok boyutlu büyük verileri işlemek için kullanılan bir yapay sinir ağı türüdür (Ozcan ve Basturk, 2019). CNN'ler en az bir katmanda evrişim işlemi gerçekleştirmektedirler ve evrişim, havuzlama (pooling) ve tam bağlı (fully-connected) olmak üzere üç temel katman içerirler (Zhang vd., 2019).

Evrişim katmanı birden fazla farklı evrişim çekirdeğinden oluşur. Bu çekirdekler görüntü üzerinde farklı özelliklerin çıkarılması için kullanılırlar. Daha sonra aktivasyon fonksiyonu kullanılarak non-lineerlik sağlanır. Bilinen aktivasyon fonksiyonlarına sigmoid, tanh (LeCun vd., 2012), ve RELU (Nair ve Hinton, 2010) örnek verilebilir. Aktivasyon fonksiyonu olarak RELU kullanılması yapay sinir ağlarının daha hızlı öğrenmesini ve daha yüksek sınıflandırma başarısı elde etmesini sağlamaktadır.

Havuzlama katmanı ile katmana girdi olarak verilen verinin çözünürlüğü düşürülerek model maliyeti azaltılmaktadır. Bilinen havuzlama işlemlerine örnek olarak ortalama (average pooling) (T. Wang vd., 2012) ve maksimum havuzlama (max pooling) (Boureau vd., 2010) verilebilir.

Evrişim ve havuzlama katmanlarından sonra bir veya daha fazla tam bağlı katman bulunur. Tam bağlı katmanlarda önceki katmandaki tüm nöronlar mevcut katmandaki tüm nöronlara bağlıdır. Bu sayede mevcut katmanda tüm nöronların bilgisi bulunmaktadır. Tam bağlı katmandan sonra ise son katman olan çıkış katmanı bulunmaktadır. Çıkış katmanında ikiden fazla sınıf etiketi olduğunda sınıflandırma yapmak amacıyla softmax operatörü sıklıkla kullanılmaktadır (Russakovsky vd., 2015). Çıkış katmanının boyutu sınıf sayısı ile aynıdır. Örnek bir CNN mimarisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Örnek bir evrişimsel sinir ağı mimarisi (An example CNN architecture)

Şekil 1’de ortalama havuzlama kullanılan bir evrişimsel sinir ağı mimarisi görülmektedir. Girdi resmi evrişim adımına verildikten sonra çıkartılan özellikler ortalama havuzlama işlemine tabi tutularak veri boyutunun küçültülmesi sağlanmaktadır. Daha sonra elde edilen sonuç verisi ikinci katmandaki evrişim işleminin girdisi olarak kullanılmaktadır. Evrişim ve havuzlama katmanları tamamlandığında son olarak tam bağlı katman ve çıktı katmanları yer almaktadır.

Bu çalışmada deneysel sonuçların elde edilmesinde kullanılan evrişimsel mimari Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’deki mimariyi kullanabilmek adına görüntüler öncelikle 512×512 piksel olarak yeniden boyutlandırılmış ve daha sonra gri formata çevrilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan evrişimsel sinir ağı mimarisi (CNN architecture used in experiments)

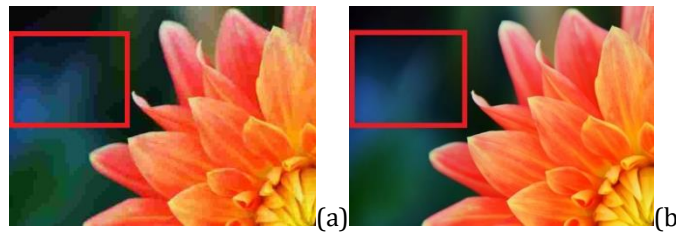
Katman	Çıktı boyutu
Girdi	(512×512×1)
Evrişim	(510×510×32)
Havuzlama	(170×170×32)
Evrişim	(168×168×64)
Havuzlama	(56×56×64)
İndirgeme	200704
Yoğun	32
Seyreltme (0.4)	-
Yoğun	32
Seyreltme (0.3)	-
Yoğun (Çıktı)	10

Tablo 1’de görüldüğü gibi evrişim işleminde seçilen 3×3 boyutundaki kayan pencere sebebiyle bu boyut 510×510’a düşmüştür. İlk katmanda 32 çekirdek kullanılmıştır. Havuzlama işleminde 3×3’lük boyuttaki bir blok tek piksele indirgendigi için boyut 170×170×32 olmuştur.

İndirgeme (flatten), eldeki verinin tek boyutlu bir veri haline getirilmesi işlemi üstlenmektedir. Yoğun katmanlar ise indirgeme katmanına doğrudan bağlıdır. Seyreltme (dropout) düğümleri verilerin eğitilmesinde aşırı öğrenmeyi (overfit) engellemek için verilen oranda nöronları görmezden gelme işlemi gerçekleştirmektedir.

3. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

JPEG, sıkıştırma aşamasında resmi 8×8 bloklara bölmekte ve bu blokların üzerinde belirli bir kayıp oluşturan niceleme (Quantization) işlemini gerçekleştirmektedir. Çok yüksek kayıplı sıkıştırma yapıldığında bu bloklardaki veri kaybı sebebiyle görüntülerde bloklama etkisi (blocking effect) gözükmemektedir (Şekil 2). Bloklama etkisi renk geçişleri fazla olan ve detaylı görüntülerde düz bir alana sahip ya da tek renkten oluşan bir resme göre daha fazla gözükmemektedir. Bu sebeple daha az görsel karmaşıklığa sahip görüntülerde düşük kalite faktörlerinde bile fazla bozulma görülmezken yüksek karmaşıklıkta görüntülerde kalite faktörünün daha yüksek tutulması gerekmektedir.



Şekil 2. Kf 10 (a) ve 100 (b) için bloklama etkisi (Blocking effect for QF10 (a) and QF100 (b))

Evrişimsel sinir ağları, kullandığı çekirdekler ile özellik çıkarımı işlemi gerçekleştirirken, önerilen yöntem bu karmaşıklığın görüntüden bir özellik vektörünün çıkartılması ile tespit edilebilmesini amaçlamaktadır. Bu sayede eğitim sırasında evrişimsel mimariye göre işlenmesi gereken veri miktarı ve eğitim sırasında yapılan işlem sayısı azaltılmış olacaktır.

Birbirine yakın renk değerlerine sahip bloklarda bloklama etkisi renk benzerliği sebebiyle daha az gözükcektir. Bloklar arası renk değerleri birbirlerinden farklıysa bloklar daha fazla görünür olacaktır. Bu sebeple önerilen yöntemde bloklama etkisinin görünürlüğünün tespiti için blokların kendi içlerindeki renk çeşitliliğinin ve bloklar arası renk farkının belirlenmesi amaçlanmıştır. Blokların kendi içindeki renk çeşitliliğinin tespiti için blok içi

varyans hesaplanmıştır. Bloklar arası renk farkının oranının tespiti için ise blokların ortalama renk değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu vektörler birleştirilerek önerilen yöntemin eğitim vektörü olarak kullanılmıştır.

Vektörün elde edilmesinde görüntü öncelikle gri tabanlı (grayscale) formata dönüştürülüp $n \times n$ boyutunda bloklara bölündükten sonra B blok sayısı, $p_{b_{ij}}$ b bloğunun (i, j) konumundaki piksel ve μ_b blok için piksel değerlerinin ortalaması olmak üzere görüntü üzerindeki her blok için varyans (V) değeri hesaplanmaktadır.

$$V_b = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p_{b_{ij}} - \mu_b)^2, b = 1, 2, \dots, B \quad (1)$$

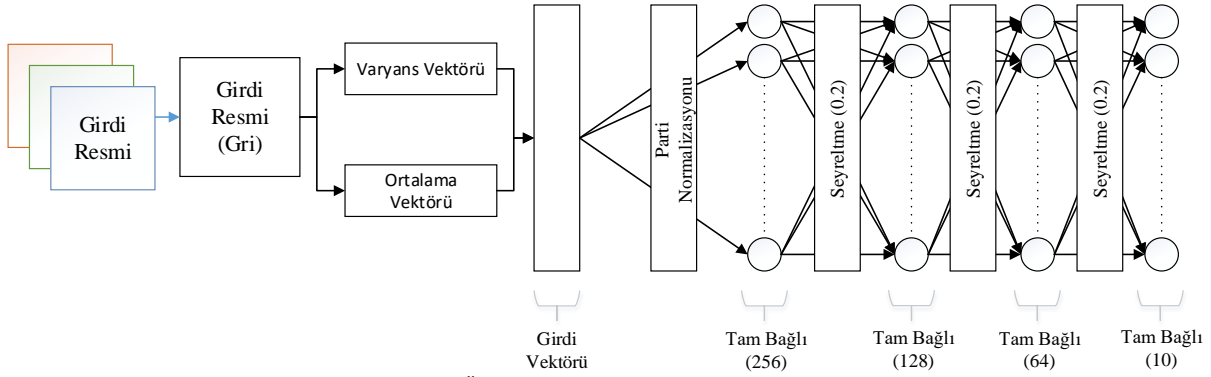
Bu işlemin amacı resmin bölünmüş her bir blok içerisindeki renk karmaşıklığını tespit etmektir. Daha sonra bloklar arası geçişte renk değişimlerinin değerini takip etmek amacı ile öncelikle her bloğun ortalama renk değeri (μ_{b-1}) hesaplanıp kendisinden sonra gelen bloğun ortalama renk değeri (μ_b) ile farkı (F) elde edilmektedir.

$$F_{b-1} = \mu_b - \mu_{b-1}, b = 2, 3, \dots, B \quad (2)$$

Elde edilen bu varyans (V) ve fark (F) değerleri özellik vektörü (O) olarak kullanılmaktadır.

$$O_{Resim} = [V_1 V_2 \dots V_B F_1 F_2 \dots F_{B-1}] \quad (3)$$

Bu özellik vektörlerinin eğitilmesi için tam bağlı katmanlardan oluşan bir sinir ağı kullanılmaktadır. Sinir ağının çıktı katmanı sınıf sayısı kadar düğüm içermektedir. Kullanılan yapı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Önerilen yöntem (Proposed method)

Girdi vektörü elde edildikten sonra parti normalizasyonu (batch normalization) işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin çıktısı 256 düğümlü bir tam bağlı katmana verilmektedir. Tam bağlı toplam 3 katmandan sonra 10 sınıf için çıkış katmanı bulunmaktadır.

4. Sınıflandırma Verisinin Elde Edilmesi (Obtaining Classification Data)

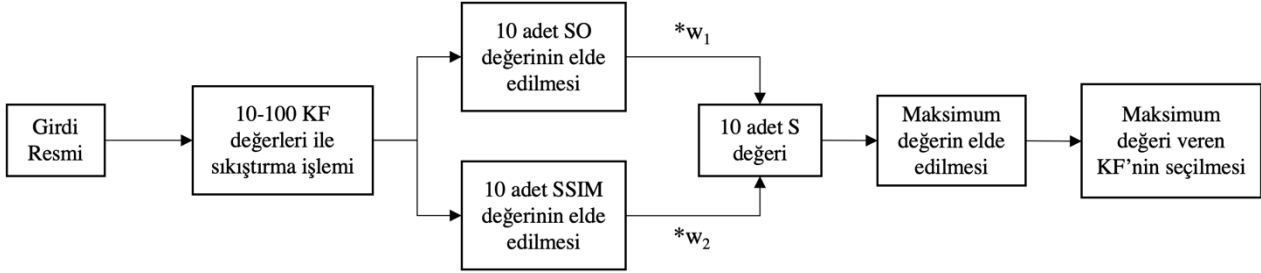
Sinir ağlarının eğitilmesi için görüntü verisinden elde edilmiş etiketli verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada görüntü verisinden kalite faktörü belirlenmesi işlemi gerçekleştirileceğinden etiket olarak dosya boyutu ve SSIM değeri parametrelerinin optimum değerine karşılık gelen kalite faktörünün elde edilmesi gerekmektedir. Mevcut görüntü derleminin içindeki her görüntüde 10 ile 100 arasındaki 10'un katındaki tüm kalite faktörü değerleri için sıkıştırılmış dosya boyutu ve SSIM değerleri elde edilmiştir. SSIM 0-1 arası değerler almaktadır. SSIM değerinin yüksek olması bozulmanın daha az olması anlamına gelmektedir. Daha sonra sıkıştırılmış dosya boyutu ve orijinal dosya boyutu değerleri kullanılarak Eşitlik 4'teki işlem gerçekleştirilmiştir ve 0-1 arasında bir Sıkıştırma oranı (SO) elde edilmiştir.

$$SO = \frac{\text{Sıkıştırılmış dosya boyutu}}{\text{Orijinal dosya boyutu}} \quad (4)$$

SSIM ve Eşitlik 4'ten elde edilen değerler dosya boyutu ve bozulma için 0-1 aralığında değerler vermektedir. Dosya boyutunun minimum ve SSIM değerinin maksimum olması istendiği için bu değerlerin ağırlıklı farkları alınarak bir skor (S) değeri hesaplanmaktadır.

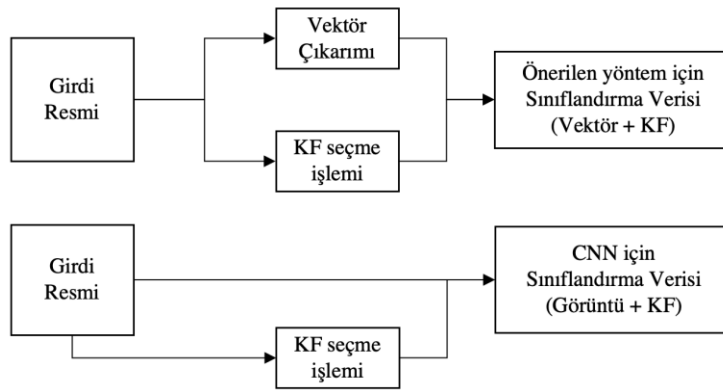
$$S = w_1 * SSIM - w_2 * SO \quad (5)$$

Burada ağırlık değerlerinin istenilen şekilde seçilmesi ile dosya boyutunun veya görüntü kalitesinin önemi belirlenebilmektedir. Görüntü üzerindeki kalitenin korunması istendiğinde w_1 değeri w_2 değerine göre daha yüksek belirlenebilmektedir. Aynı şekilde sıkıştırma miktarı önemli fakat kalite önemsiz ise w_2 değeri w_1 değerine göre yüksek seçilebilecektir. İki ağırlığın eşit seçilmesi durumunda dengeli bir kalite faktörü belirlenecektir.



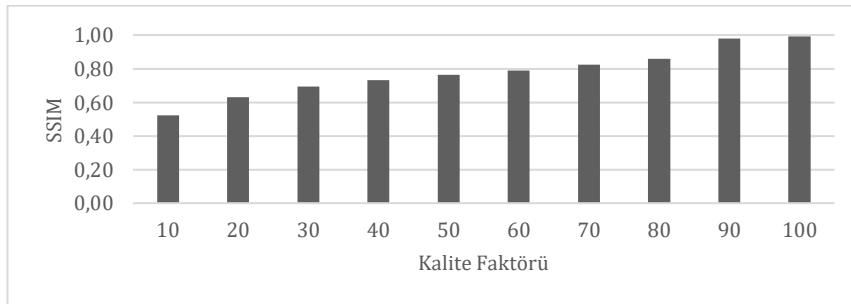
Şekil 4. Kalite faktörünün belirlenmesi (Selection of quality factor)

Şekil 4'te sınıflandırma verisinin elde edilmesi için ihtiyaç duyulan kalite faktörü değerinin belirlenmesi işlemi gösterilmiştir. Girdi resmi sıkıştırılıp aynı anda dosya boyutu eldesi ve kalite ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Daha sonra bu değerler istenilen ağırlık değerleri ile çarpılarak 10 farklı kalite faktörü için S değerleri elde edilmektedir. Son aşamada ise maksimum S değerine sahip kalite faktörü o görüntü için etiket verisi olarak seçilmektedir.



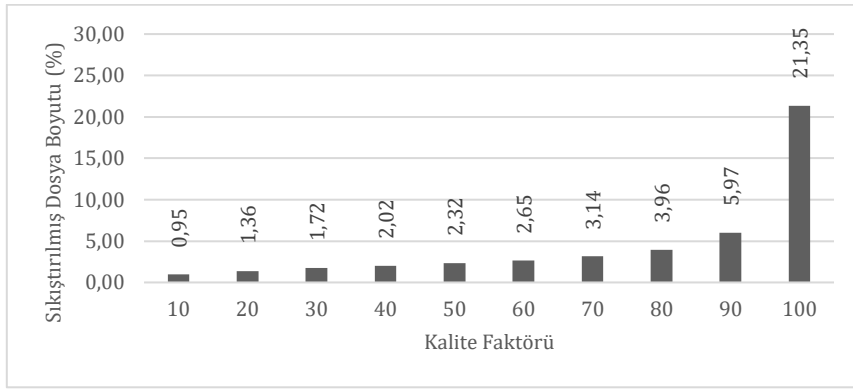
Şekil 5. Sınıflandırma verisinin elde edilme aşamaları (Stages of obtaining classification data)

CNN ve önerilen yöntem için veri seti ayrı ayrı hazırlanmaktadır (Şekil 5). Tüm görüntü dosyaları için kalite faktörleri belirlendikten sonra CNN veri seti girdi görüntüsü ve kalite faktörü ikilisi olarak oluşturulmaktadır. Önerilen yöntemde ise görüntüden üçüncü bölümde belirtildiği gibi bir vektör çıkarımı gerçekleştirilmektedir. Bunun ardından CNN'de olduğu gibi elde edilen vektör ve kalite faktörü ikilileri eğitim verisi olarak belirlenmektedir.



Şekil 6. Kalite faktörüne göre SSIM değerinin değişimi (Change of SSIM value according to the quality factor)

Kalite faktörünün 10-100 arasındaki değişimindeki bozulma lineer değildir. Bu sebeple belirli bir değer altında bozulmadaki artış kalite faktöründeki azalmadan daha fazla olmaktadır (Şekil 6).



Şekil 7. Kalite faktörüne göre sıkıştırılmış dosya boyutunun değişimi (Change of compressed file size according to quality factor)

Şekil 7'deki grafikte de görüldüğü gibi bir dosya için kalite faktörü ile sıkıştırma oranı da doğru orantıya sahip değildir. Değişimdeki bu non-lineerlik sebebiyle optimum kalite faktörü farklı ağırlıklar için farklı aralıklarda elde edilmektedir. Bu sebeple deneysel sonuçlarda farklı ağırlıklara göre yapılan sınıflandırmada farklı kalite faktörü değerleri bulunmaktadır.

5. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yapılan çalışmada "The Open Images Dataset v4" derleminden 389655 adet görüntü üzerinde bir önceki bölümde kullanılan sınıflandırma yöntemi ile etiketleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra etiketlenen bu veriler üzerinde Tablo 1'deki evrimsel sinir ağı ve Şekil 3'te verilen önerilen sinir ağı eğitilmiş ve başarımları elde edilmiştir. Tüm ağların eğitiminde görüntüler 512×512 boyutuna indirgenmiş, gri formatta kullanılmıştır. Eğitim 20 adım (epoch) ve 32 parti (batch) büyüklüğü parametresi seçilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca eğitimde aşırı öğrenmenin tespiti amacıyla veri seti %80-%20 oranında bölünmüş ve %20'lik kısmı geçerleme (validation) için kullanılmıştır. Sınıflandırma için w_1 (SSIM) ve w_2 (sıkıştırma oranı) ağırlıkları sırasıyla %30-%70, %50-%50 ve %70-%30 olarak belirlenmiştir. Bu oranların seçiminde veri setinin dağılımı göz önüne alınmıştır. Herhangi bir ağırlığın %30'un altına düşürülmesi durumunda veri setinde en iyi sonucu veren kalite faktörü değeri tek bir noktada toplanmaktadır. Örneğin w_1 ve w_2 değerleri sırasıyla %20 ve %80 olarak belirlendiğinde örneklerin 387546 tanesi (%99'u) 100 kalite faktörü sınıfına dahil olmaktadır. Benzer şekilde w_1 ve w_2 değerlerinin %80 ve %20 seçilmesi durumunda örneklerin tamamı 10 kalite faktöründe toplanmaktadır. Bu durumda elde edilen veri seti eğitim için uygun olmamaktadır. Eğitim verisi dağılımının en iyi olduğu oranlar seçilmiş ve bu oranlar için her sınıfa düşen eğitim verisi miktarı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı oranlar için her sınıfa karşılık gelen eğitim örneği sayısı (Training sample count for each class for different ratios)

Oran(w_1 - w_2)	Sınıflar									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30-70	427	283	1123	3494	7934	16192	55219	94560	191732	18691
50-50	226	127	170	140	826	1273	16180	41487	208547	120679
70-30	190	103	128	80	596	596	6991	20202	116489	244280

Beklendiği üzere 10-60 arası kalite faktöründe olmasına rağmen S değeri yüksek olan görüntü sayısı diğer sınıflara göre çok daha azdır. Genellikle görüntüler 80, 90 ve 100 kalite faktörlerinde optimum oranı elde etmiştir.

Önerilen yöntemde blok boyutunun 64×64 seçildiği durumda farklı oranlardaki başarımları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Önerilen yöntemin farklı oranlar için sonuçları (Results of the proposed method for different ratios)

Oran(w_1 - w_2)	Eğitim		Geçerleme	
	Kayıp	Doğruluk	Kayıp	Doğruluk
30-70	1.1171	0.5461	1.1076	0.5466
50-50	0.8433	0.6451	0.8457	0.6463
70-30	0.6379	0.7185	0.6533	0.7105

Tablo 3'ten görüldüğü üzere en yüksek doğruluk SSIM değerinin yüzdeliğinin %70 oranında seçilmesi (70-30) ile elde edilmiştir. Önerilen yöntemde blok büyüklüğünün etkisinin incelenmesi amacı ile en iyi sonuçların elde

edildiği 70-30 oranındaki sınıflandırma üzerinde 64×64, 32×32 ve JPEG'in blok boyutu olan 8×8 boyutları seçilmiş ve başarı sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. 70-30 oranı için önerilen yöntemin farklı blok boyutlarında elde edilen sonuçlar (Results obtained for different block sizes of the proposed method for 70-30 ratio)

Blok Boyutu	Eğitim		Geçerleme	
	Kayıp	Doğruluk	Kayıp	Doğruluk
64×64	0.6379	0.7185	1.2381	0.7105
32×32	0.6019	0.7440	0.6533	0.7284
8×8	0.5034	0.8024	0.6298	0.7372

Tablo 4'te görüldüğü gibi en yüksek doğruluk 8×8 bloklardan elde edilmektedir. Bunun sebebi blok boyutunun küçülmesi ile resmin karmaşıklığı ile ilgili elde edilen bilginin artması ve sinir ağının daha fazla bilgi sahibi olabilmesidir. Önerilen yöntemin en iyi sonucunun elde edildiği 8×8 blokların evrişimsel sinir ağı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Evrişimsel sinir ağı ile önerilen yöntemin karşılaştırılması (Comparison of the convolutional neural network and the proposed method)

Yöntem	Oran	Eğitim		Geçerleme	
		Kayıp	Doğruluk	Kayıp	Doğruluk
Evrişimsel	30-70	1.1888	0.5210	1.2921	0.5497
	50-50	0.9845	0.6064	0.9707	0.5491
	70-30	0.7858	0.7088	0.6906	0.7146
Önerilen Yöntem (8×8)	70-30	0.5034	0.8024	0.6298	0.7372

Tablo 5'ten görüldüğü üzere önerilen yöntem 8×8 blok boyutunda SSIM değerine %70 ağırlık verildiğinde evrişimsel sinir ağının tüm sonuçlarından daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca evrişimsel sinir ağında da en yüksek sınıflandırma başarısı SSIM değerinin %70 ağırlıklı olduğu durumda elde edilmiştir.

CNN'de görüntülerin tümünün kullanılmasına karşılık önerilen yöntemde vektörlerin çıkartılması eğitim uzayını küçültmektedir. 512×512 bir görüntü dosyası 786432 bayt (512×512×3) yer kaplarken, bu görüntüden çıkartılan bir vektör en küçük blok boyutu olan 8×8 boyutunda seçildiğinde 8191 bayt (4096 + 4095) yer kaplamaktadır. Böylece önerilen yöntemde eğitim işlemi daha az kaynak ihtiyacı duymaktadır.

Yöntemlerin başarısının ölçülmesinde sınıflandırma nominal olarak gerçekleştirildiği için yöntemin 80 kalite faktörü yerine yakın olan 70 veya 90 gibi bir kalite faktörüne göre karar vermesi durumunda bile yanlış sınıflandırma olarak kabul edilecek ve başarıyı düşürecektir. Buna rağmen önerilen algoritma %80 oranında bir eğitim başarısı ve %73 oranında bir geçerleme başarısı elde etmiştir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Görüntü verilerinin sıkıştırılması kadar kaliteli saklanması da önemlidir. Sıkıştırmayı kaliteyi bozmadan sağlayabilmek adına optimum kalite faktörünün seçilmesi hem görüntüdeki bozulmayı minimize edecek hem de kaliteden belirli bir seviyeye kadar ödün vermeden yer kazancı sağlanacaktır.

Bu çalışmada önerilen yöntem ile resmin karmaşıklığının tespitinin yapılması amaçlanmıştır. Karmaşıklığın doğru bir şekilde tahmin edilmesi sınıflandırma başarısı açısından önem arz etmektedir. Yöntem blokların piksel çeşitliliği ve bloklar arası farkı tespit etmeyi amaçlamaktadır.

Görüntü verilerinde özellik çıkarımı için oldukça fazla kullanılan evrişimsel sinir ağları görüntüdeki özellikleri elde edip buna göre sınıflandırma gerçekleştirebilmektedir. Görüntü üzerinde çeşitli maskelerin gezdirilmesi ile elde edilen özellikler üzerinden eğitim gerçekleştiren bu ağlar sıkıştırma için yapılan sınıflandırmada karmaşıklığı bulma konusunda önerilen yöntem kadar başarılı sonuçlar göstermemiştir.

Çalışmada önerdiğimiz yöntem ile çıkarılan vektörler sayesinde görüntü verisinin evrişimsel ağlara verilmesine göre çok daha küçük bir veri uzayında çalışabilmekte ve bu sayede yöntemin karmaşıklığı evrişimsel sinir ağlarına göre daha düşük olmaktadır. Böylece modelin kullanılmasında ihtiyaç duyulan kaynaklar da azaltılabilmektedir.

Önerilen yöntem sayesinde yöntemin kullanılacağı ortamın ihtiyacına göre belirlenecek ağırlıklarla kalite faktörü seçimi yapılmaktadır. Veri boyutunun önemli olduğu durumlarda yöntem düşük kalite ve yüksek sıkıştırma

oranları için düşük kalite faktörlerini seçmektedir. Aksi takdirde algoritma görüntünün kalitesini belirli bir seviyenin üstünde tutabilecek optimum kalite faktörünü seçiyor olacaktır.

İleride yapılacak çalışmalarda blok içi ve bloklar arası farklı metrikler denenip başarı oranına etkisinin elde edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca veri çeşitliliğinin artırılması ve veriyi açıklayabilecek daha iyi metriklerin bulunması ile mevcut modelin daha fazla genelleştirilmesi ve başarı oranının artırılması amaçlanmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Artusi, A., Mantiuk, R.K., Richter, T., Korshunov, P., Hanhart, P., Ebrahimi, T., Agostinelli, M., 2016. JPEG XT: A Compression Standard for HDR and WCG Images. *IEEE Signal Processing Magazine*, 33 (2), 118–24.
- Baştürk, A., Baştürk, N.B., Qurbanov, O., 2018. Parmak İzi Tanıma İçin Farklı Sınıflandırıcıların Karşılaştırmalı Başarım Analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 504–13.
- Boureau, Y.L., Ponce, J., Lecun, Y., 2010. A Theoretical Analysis of Feature Pooling in Visual Recognition. *ICML 2010 - Proceedings, 27th International Conference on Machine Learning*.
- Çelik, Ö., Osmanoğlu, U. Ö., & Çanakçı, B., 2020. Sosyal Medya Yorumlarından Duygu Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 366–374.
- Cengil, E., Çınar, A., 2016. A New Approach for Image Classification: Convolutional Neural Network. *European Journal of Technic EJT*, 6 (2), 96–103.
- Çevik, K. K., Kayakuş, M., 2020. Bilişim Teknolojileri Departmanında Kullanıcıların Taleplerine Cevap Verme Süresinin Makine Öğrenmesi İle Tahmin Edilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 728–739.
- Dufaux, F., Sullivan, G.J., 2009. The JPEG XR Image Coding Standard. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- Gonzalez, T.F., 2007. *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*. *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*, 1–1432.
- Işık, N., Işık, A. H., 2020. Yapay Sinir Ağları İle Elektrostatik Lens Sistem Tasarımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 388–396.
- Kuznetsova, A., Rom, H., Alldrin, N., Uijlings, J., Krasin, I., Pont-Tuset, J., Kamali, S., et al., 2018. The Open Images Dataset v4: Unified Image Classification, Object Detection, and Visual Relationship Detection at Scale. *ArXiv Preprint ArXiv:1811.00982*.
- LeCun, Y.A., Bottou, L., Orr, G.B., Müller, K.R., 2012. *Efficient Backprop*. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*.
- Masters, D., Luschi, C., 2018. Revisiting Small Batch Training for Deep Neural Networks, 1–18.
- Nair, V., Hinton, G.E., 2010. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines. In *ICML 2010 - Proceedings, 27th International Conference on Machine Learning*.
- Özcan, T., Baştürk, A., 2019. Lip Reading Using Convolutional Neural Networks with and without Pre-Trained Models. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7 (2), 195–201.
- Pinto, N., Cox, D.D., DiCarlo, J.J., 2008. Why Is Real-World Visual Object Recognition Hard? *PLoS Computational Biology*, 4 (1), 0151–56.
- Randers-Pehrson, G., Boutell, T., 1999. PNG (Portable Network Graphics) Specification, Version 1.2. PNG Development Group.
- Rende, F.Ş., Bütün, G., Karahan, Ş., 2016. Derin Öğrenme Algoritmalarında Model Testleri: Derin Testler. *CEUR Workshop Proceedings*, 172154–59.
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., et al., 2015. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*.
- Skodras, A., Christopoulos, C., Ebrahimi, T., 2001. The JPEG 2000 Still Image Compression Standard. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- Wallace, G.K., 1992. The JPEG Still Picture Compression Standard. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*.
- Wang, T., Wu, D.J., Coates, A., Ng, A.Y., 2012. End-to-End Text Recognition with Convolutional Neural Networks. In *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition*.
- Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., Simoncelli, E.P., 2004. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*.
- Zhang, Q., Zhang, M., Chen, T., Sun, Z., Ma, Y., Yu, B., 2019. Recent Advances in Convolutional Neural Network Acceleration. *Neurocomputing*, 32337–51.



CİHAZDAN CİHAZA HABERLEŞMEDE GİRİŞİM GİDERİMİ YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI

Meryem TAŞER, Mustafa NAMDAR*, Arif BAŞGÜMÜŞ

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Cihazdan Cihaza
Haberleşme,
Girişim Sınırlı Alan,
Kaynak Tahsisi ve
Mod Seçimi,
Toplam Kullanıcı Hızı.*

Öz

Bu çalışmada, cihazdan cihaza (D2D) haberleşme çiftleri arasında, hücrel kullanıcılar arasında ve D2D çifti ile hücrel kullanıcılar arasında oluşan girişim problemlerini gidermeyi amaçlayan, iki farklı sistem modeli analiz edilmektedir. İlk incelenen sistem modeli, eşit güç kontrolü ve kısıtlamalar kullanılarak gerçekleştirilen parçacık sürü optimizasyonu (PSO) tabanlı kaynak tahsisi ve mod seçimidir. Bu yöntemle mevcut alt kanalların verimli ve optimal şekilde kullanılması, en yüksek seviyeli toplam kullanıcı hızının elde edilmesi sağlanmaktadır. İlave olarak, kullanıcı sayısı, yol kaybı üssü, yol kaybı değeri, iterasyon sayısı, alt kanal sayısı gibi toplam kullanıcı hızını etkileyen faktörler de değerlendirilmektedir. Analiz edilen diğer sistem modelinde, hücrel kullanıcıların D2D kullanıcı çiftine oluşturdukları girişim için bir eşik seviyesi belirlenmektedir. Eşik seviyesi değeri ile oluşturulan girişim sınırlı alan için üzerinde çalışılan ikinci sistem modeli ile girişim azaltma ve toplam kullanıcı hızını, kaynak tahsisi ve mod seçimi yöntemine göre yükseltme başarımı sağlanmaktadır. Her iki sistem modeli için, hücrel kullanıcı sayısı temel alınarak, toplam kullanıcı hızları karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonucunda girişim sınırlı alan sistem modelinin girişim gideriminde kaynak tahsisi ve mod seçimi modeline göre daha etkili olduğu görülmüştür. Girişim sınırlı alan sistem modelinde, girişim sınırlı alana hücrel kullanıcılardan bazıları dahil olmadığı için kapasite kaybına neden olmaktadır. Kaynak tahsisi ve mod seçiminde kapasite kaybı gerçekleşmemektedir.

PERFORMANCE COMPARISON OF INTERFERENCE MITIGATION METHODS IN DEVICE-TO-DEVICE COMMUNICATION

Keywords

*Device-to-Device
Communication,
Interference Limited Area,
Resource Allocation and
Mode Selection,
Total Throughput.*

Abstract

In this study, two different system models are analyzed which aim to mitigate interference problems between device-to-device (D2D) communication pairs, cellular users, cellular users and D2D pair. The first system model examined is the particle swarm optimization (PSO) based resource allocation and mode selection using equal power control and constraints. With this method, it is ensured that the existing subchannels are used efficiently and optimally, and the highest total throughput is obtained. Additionally, the factors affecting the total throughput, such as number of users, path loss exponent, path loss value, number of iterations, number of subchannels, are also evaluated. In the other system model analyzed, a threshold level is determined for the interference that cellular users create to the D2D user pair. For the interference-limited area created with the threshold level value, the second system model studied is used to reduce the interference reduction and increase the total throughput according to the resource allocation and mode selection method. For both system models, total throughputs are compared based on the number of cellular users. As a result of the comparison, it has been observed that the interference-limited area system model is more effective in interference mitigation than the resource allocation and mode selection model. In the interference-limited area system model, the interference-limited area causes loss of

* İlgili yazar / Corresponding author: mustafa.namdar@dpu.edu.tr, + 90 274 443 4226

capacity as some of the cellular users are not included. There is no capacity loss in the resource allocation and mode selection.

Alıntı / Cite

Taşer, M., Namdar, M., Başgümüş, A., (2020). Cihazdan Cihaza Haberleşmede Girişim Giderimi Yöntemlerinin Performans Karşılaştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1019-1030.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Taşer, 0000-0003-3577-3495
M. Namdar, 0000-0002-3522-4608
A. Başgümüş, 0000-0002-0611-3220

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.05.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.08.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	23.09.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Telsiz haberleşmede, artırılabilir hız ve iletişim kalitesi, son kullanıcılar için önemli gereksinimlerdendir. Kullanıcı sayılarının artmasıyla bu ihtiyacı karşılamak daha da zorlaşmıştır. Cihazdan cihaza (D2D) haberleşme spektrum ve enerji verimliliğini artırmak, trafik yükünü azaltmak amacıyla önerilen çözümlerden biridir (Asadi vd., 2014). D2D haberleşme, spektrum kullanımını iyileştirmek, pil tüketimini azaltmak, daha iyi kullanıcı deneyimi sağlamak, ağ verimini ve veri hızını arttırmak amacıyla gelecekteki telsiz ağlara entegre edilebilecek dikkat çekici bir yöntemdir. Bu yöntem, ses ve veri trafiğini iletmek için bir baz alıcı-verici istasyonu (BTS) kullanmak yerine yerel bir bağlantı kurarak birbirine yakın iki kullanıcı cihazın doğrudan iletişim kurması esasına dayanır. BTS ile ilgili iletişim probleminin mevcut olması durumunda, D2D haberleşme, yedek iletim ağı olarak da kullanılabilir (Khalid 2014). Öte yandan D2D haberleşme kullanımı belirli problemleri de beraberinde getirmektedir. Aynı kaynağı kullanan hücrel kullanıcılar ile D2D çifti arasında ya da aynı kaynağı kullanan D2D çiftleri arasında girişim oluşmaktadır. Bu girişimin, iki farklı sistem modeli kullanılarak azaltılabileceği öngörülmektedir. İlk sistem modelinde oluşturulan kaynak tahsisi ve mod seçimi yaklaşımında ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) sistemi kullanılmıştır. OFDMA, kanalın N tane dikgen alt-kanallara bölündüğü ve bu alt kanalların belirli kurallara göre kullanıcılara paylaştırıldığı çoklu erişim tekniğidir. Oluşturulan sistem modeli, veriyi OFDMA sonucu elde edilen alt kanallar yoluyla iletir (Akbulut 2012). Uygun kaynak tahsisi ve mod seçimi yaklaşımı ile mevcut alt kanallar verimli ve optimal şekilde kullanılması sağlanmakta, yüksek toplam kullanıcı hızı seviyelerine ulaşılabilmektedir (Engin 2015). Kaynak tahsisi ve mod seçimi için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması tercih edilmiştir. İkinci sistem modeli girişim sınırlı alandır. Girişim sınırlı alan sistem modelinde ise çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) yapı tercih edilmiştir. Girişim önlemek için sifra zorlamalı huzmeleme yöntemi kullanılmıştır ve D2D kullanıcılarına oluşan girişim için bir eşik değeri konulmuştur. D2D çiftleri, bu eşik değerinin üzerindeki hücrel kullanıcıların kaynağını yeniden kullanamamaktadır. Eşik değerinin altında kalan hücrel kullanıcılar aday kümesine dahil edilir. D2D çiftinin, hangi hücrel kullanıcının kaynağını yeniden kullanacağını seçimi, aday kümesinden yarı ortogonal kullanıcı seçim algoritması ile belirlenmektedir. İki sistem modeli de toplam kullanıcı hızını arttırıp, girişimi azaltmayı hedeflemektedir.

Literatürdeki çalışmalarda, kaynak tahsisi ve mod seçimi yöntemine farklı açılardan değinilmiştir (Pang vd., 2013; Sun ve Shin, 2014; Takshi vd., 2018; Su vd., 2013; Deng vd., 2012). İncelenen çalışmalarda kaynak tahsisi ve mod seçimi yöntemi girişim azaltma, toplam kullanıcı hızını, sistem performansını ve verimliliği artırma, kesinti olasılığını azaltma gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Sun ve Shin (2014)'te, daha iyi sistem performansı bakımından incelenmiştir ve D2D haberleşmede, birden fazla D2D kullanıcı çiftinin aynı alt kanalı kullanmasının, daha iyi sistem performansı sağlayacağından bahsetmektedir. Deng vd. (2012)'de eşit güç dağılımı kullanılarak toplam kullanıcı hızının daha da iyileştirilmesini amaçlamış, verimlilik ve kesinti olasılığı bakımından performans karşılaştırmasına yer vermiştir. Su vd. (2013)'te kaynak tahsisi ve mod seçiminin kullanılma amacının girişimi azaltmak olduğunu ifade etmiştir. Öte yandan, kaynak tahsisi ve mod seçiminin literatür çalışmalarında, farklı algoritmalar tercih edilmiştir. Pang vd. (2013)'te evrimsel algoritma optimizasyonunu kullanan kaynak tahsisi ve mod seçimi yöntemini önermiştir. Evrimsel algoritmadaki karmaşıklığından kurtulmak için Sun ve Shin (2014), Su vd. (2013)'te kaynak tahsisi ve mod seçimi algoritması olarak PSO algoritmasını uygulamışlardır. Kaynak tahsisi ve mod seçimi yöntemi için hücrel kullanıcının alt kanalını kaç tane D2D çifti ile kullanacağı çalışmalar da farklılık göstermektedir. Pang vd. (2013) ve Sun ve Shin (2014) çalışmalarında, aynı kaynağı kullanan birden fazla D2D çifti dikkate alınmıştır. Deng vd. (2012)'de, Takshi vd. (2018)'de ve Su vd. (2013)'te aynı kaynağı bir D2D çiftinin kullanmasına izin verildiği belirtilmektedir. Bu çalışmada ise, kaynak tahsisi ve mod seçimi için PSO algoritması kullanılmış, girişimin azaltılması ve yüksek toplam kullanıcı hızına ulaşılması hedeflenmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda, hücrel kullanıcıların D2D çiftine oluşturduğu girişimi azaltmak için girişim sınırlı alanın önerildiği de görülmektedir (Min vd., 2011, Chen vd., 2012, Hou vd., 2017). Bir adet hücrel kullanıcı ile bir adet D2D çifti arasındaki girişim, belirlenen eşik seviyesi değerinden büyük ise, D2D çifti hücrel kullanıcının kanalını yeniden kullanamaz. D2D çiftinin kanalı yeniden kullanmadığı bu alan, girişim sınırlı alan olarak

tanımlanmaktadır (Min vd., 2011). Bu durumda, sistem kapasitesinin arttığı gözlenmektedir. Chen vd. (2012)'de, iki D2D çifti ve önceden seçilen hücre kullanıcı arasında, girişimi önlemek amacıyla, girişim sınırlı alandaki iki D2D çiftinin aynı radyo kaynaklarını paylaşmasına izin vermeyen yeni bir girişim sınırlı alan (ILA) metodu önerilmiştir. Burada, yüksek sistem kapasitesine ulaşıldığı belirtilmektedir. Hou vd. (2017)'de ise girişim sınırlı alandaki D2D çiftleri, yarı çift yönlü iletişim yerine, tam çift yönlü iletişim kullanmıştır. Sonuç olarak, kapasite kazancının daha da arttığına dikkat çekilmektedir.

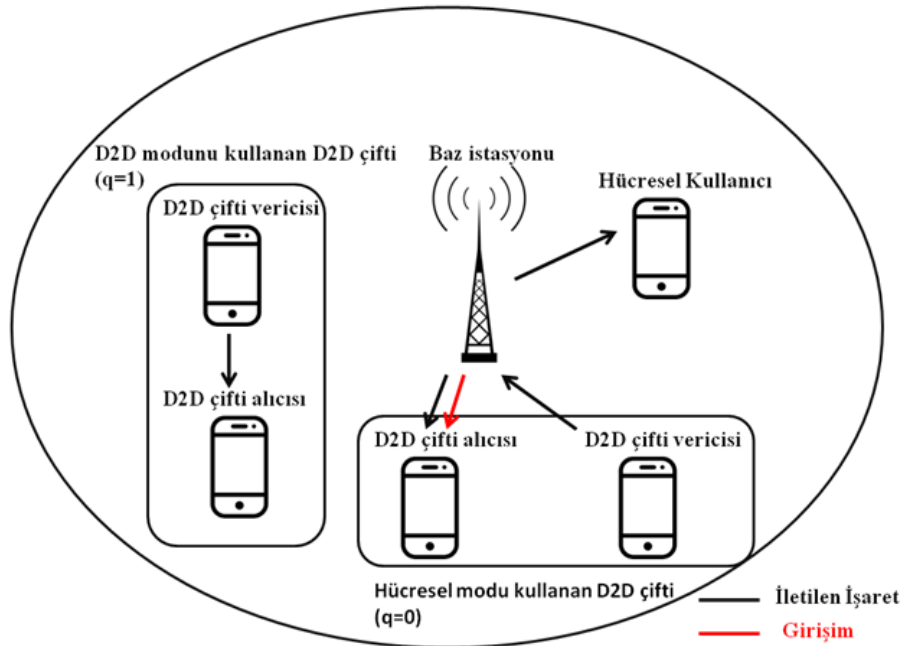
Bu çalışmada iki sistem modeli incelenmiştir. Analiz edilen ilk sistem modelinde, girişimi azaltmak ve toplam kullanıcı hızını artırmak amacıyla PSO tabanlı kaynak tahsisi ve mod seçimi algoritması kullanılmıştır. Toplam kullanıcı hızına etkisi olan parametreler incelenmiştir. Önerilen diğer sistem modelinde ise eşik değerinden yüksek girişim oluşturan hücre kullanıcıları için, girişim sınırlı alan yöntemi ile çalışılmıştır. Bu iki sistem modeli, toplam kullanıcı hızı bakımından değerlendirilmiştir.

Çalışmanın II. bölümünde, kaynak tahsisi ve mod seçimi sistem modeli aktarılmıştır. III. bölümde, önerilen ilk sistem modeli için PSO yöntemi değerlendirilmiştir. İncelenen diğer sistem modeli olan girişim sınırlı alan çözümü, IV. bölümde sunulmuştur. Nümerik sonuçların analiz edildiği V. bölümde performans sonuçları detaylı şekilde verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Kaynak Tahsisi ve Mod Seçimi Sistem Modeli (Resource Allocation and Mode Selection System Model)

Bu çalışmada ilk olarak, tek bir hücrede D adet D2D çiftinin ve N_K adet hücre kullanıcılarının bulunduğu bir sistem modeli incelenmektedir. Toplam kullanıcı sayısı $k=1, 2, \dots, K$ ile ifade edilmektedir. OFDMA kanallarının, alt kanallara bölünerek bant genişliğinin verimli şekilde kullanılması, kullanıcılara uygun şekilde kaynak tahsisi yapılarak toplam son kullanıcı hızının en yüksek seviyeye ulaşması sağlanmaktadır. Bu durumda, OFDMA yönteminin, diğer yaklaşımlara göre girişimden daha az etkilendiği gözlenmektedir (Mingan ve Cetin 2017). Dolayısıyla bu çalışmada da OFDMA tercih edilmiştir. OFDMA'da kullanılan alt kanal sayısı ise $n=1, 2, \dots, N$ ile ifade edilmektedir. Ayrıca OFDMA alt kanallarında diğer D2D çiftleri için, iki farklı mod kullanılmaktadır. Bir D2D çiftinin, BTS ile haberleşmeden doğrudan D2D çiftleri ile haberleşmek için kullandığı mod, $q=1$ 'dir. D2D çiftinin, hücre kullanıcılarının frekansını yeniden kullandığı mod ise $q=0$ olarak tanımlanmıştır. Kaynak tahsisi ve mod seçimi sistem modeli Şekil 1'de gösterilmektedir. Modu q olan n . alt kanalı kullanan k . kullanıcının hızı $r_{k,n}^{(q)}$ ile ifade edilmektedir. D2D çiftinin $q=1$ modundaki kullanıcı hızı $r_{k,n}^{(1)}$ şeklinde tanımlanmaktadır:

$$r_{k,n}^{(1)} = B \log_2(1 + (P_{k,n}^{D2D} G_{k,n}^{D2D}) / (P_n + I_{k,n})). \quad (1)$$



Şekil 1. Kaynak tahsisi ve mod seçimi sistem modeli (Resource allocation and mode selection system model)

Burada B , bant genişliğini ifade etmektedir. $P_{k,n}^{D2D,max}$, D2D çiftleri için atanan maksimum güç olup tüm D2D çiftlerine eşit olarak paylaştırılarak D2D iletim gücü, $P_{k,n}^{D2D}$ elde edilir. $G_{k,n}^{D2D}$ kullanılan sistem modelinde D2D çiftlerindeki yol kaybı modelini, $L_{D2D,k} = 148 + 40 \log_{10} d_{D2D,k}$ dB temsil etmektedir (UMTS 2014). k . D2D çiftinin D2D alıcısı ile D2D vericisi arasındaki mesafe $d_{D2D,k}$ ile belirtilmektedir ve km cinsinden alınmıştır. P_n termal gürültüyü, $I_{k,n}$ ise k . hücrel kullanıcıya ya da k . D2D çiftinde meydana gelen girişimi belirtmektedir. Doğal logaritma fonksiyonu $\log_2(.)$ ile gösterilmektedir.

İletim yarı çift yönlü, dolayısıyla yukarı link ve aşağı link olmak üzere iki zaman diliminde gerçekleşmektedir. İlk zaman diliminde, D2D çifti veriyi (yukarı yönde) BTS'ye iletmekte, ikinci zaman diliminde ise BTS veriyi (aşağı yönde) kullanıcılara iletmektedir. Dolayısıyla kullanıcı hızı, iki zaman dilimi için elde edilen kullanıcı hızlarından en küçük olanının yarısına bağlıdır (Su vd., 2013). Kullanıcı hızı $q=0$ modunda $r_{k,n}^{(0)}$ ile ifade edilmektedir. D2D çiftinin $q=0$ modundaki kullanıcı hızı $r_{k,n}^{D2D(0)}$ ile tanımlanmaktadır. Hücrel kullanıcının $q=0$ modundaki kullanıcı hızı ise $r_{k,n}^{HK(0)}$ ile verilmektedir:

$$r_{k,n}^{D2D(0)} = (1/2) \min(B \log_2(1 + (P_{k,n}^{BTS} G_{k,n}^{BTS}) / (P_n + I_{k,n})), B \log_2(1 + (P_{k,n}^{D2D} G_{k,n}^{BTS}) / (P_n + I_{BTS,n}))) \quad k \in D2D, \quad (2)$$

$$r_{k,n}^{HK(0)} = B \log_2(1 + (P_{k,n}^{BTS} G_{k,n}^{BTS}) / (P_n + I_{k,n})) \quad k \in HK. \quad (3)$$

Burada, BTS için atanan maksimum gücün, $P_{k,n}^{BTS,max}$ alt kanallar arasında eşit olarak paylaştırılması ile BTS iletim gücü, $P_{k,n}^{BTS}$ elde edilmektedir. $G_{k,n}^{BTS}$, kullanılan sistem modelinde BTS'den hücrel kullanıcılara ya da BTS'den D2D çiftine etki eden yol kaybı modelini, $L_{BTS,k} = 128 + 37.6 \log_{10} d_{BTS,k}$ dB temsil etmektedir (UMTS 2014). BTS ile k . hücrel kullanıcı arasındaki mesafe $d_{BTS,k}$ ile gösterilmektedir ve km cinsinden alınmıştır. $I_{BTS,n}$, BTS'de meydana gelen girişimi tanımlamaktadır. Bu çalışmada eşit güç tahsisi dikkate alınmaktadır. Maksimum güç kullanıcılar arasında eşit olarak bölünmektedir (Deng vd., 2012).

3. PSO Algoritma Tasarımı (PSO Algorithm Design)

PSO algoritması, kuş sürülerinin sergiledikleri hareketlerden yola çıkarak tasarlanmıştır. Bu algoritmada temel amaç, sürüdeki en iyi konuma sahip bireyi tespit ederek diğer bireylerin de o konuma doğru hareket etmesini sağlamaktır. PSO'da, parçacıklar çözümleri, çözümler de sürüleri oluşturmaktadır. Sürüdeki parçacıkların ilk konumları rastgele belirlenmektedir. PSO'da parçacıklar ilk iterasyonlarda yerel minimum noktalarına da gider, ancak iterasyon ilerledikçe atalet ağırlığının da etkisiyle optimum değere ulaşılır (Wachowiak vd., 2004). Sürüdeki çözüme en yakın değer, P_g^t küresel en iyi, parçacığın önceki iterasyonlar süresince çözüme en yakın değeri, P_i^t ise yerel en iyidir. Parçacıkların hızı küresel en iyi ve yerel en iyi değerlerine göre güncellenerek, parçacığın son konumu oluşmaktadır (Basgumus vd., 2015). Parçacığın bir sonraki iterasyondaki hızı (4) ile belirtilmektedir:

$$V_m^{t+1} = wV_m^t + (\text{rand}().c_1(P_i^t - X_m^t)) + (\text{rand}().c_2(P_g^t - X_m^t)). \quad (4)$$

Parçacığın güncel konumu, (4) yardımıyla (5)'teki gibi elde edilmektedir:

$$X_m^{t+1} = X_m^t + V_m^{t+1}. \quad (5)$$

Burada, parçacık sayısı m , iterasyon sayısı ise t ile tanımlanmaktadır. V_m^t , m . parçacık değerinin t . iterasyondaki hızını, X_m^t ise m . parçacığın t . iterasyondaki konumunu ifade etmektedir. V_m^{t+1} ve X_m^{t+1} sırasıyla, bir sonraki iterasyondaki hızı ve konumu göstermektedir. Literatürde değeri genellikle 0.4 ya da 0.9 olarak alınan ve önceki iterasyondaki hızın yeni iterasyondaki hıza etkisini azaltan atalet bileşeni, w ile gösterilmektedir. Rastgele fonksiyon $\text{rand}().$ ile tanımlanmaktadır. Parçacığın iterasyonlardaki kendi en iyi konumuna doğru yönelme ölçütü c_1 katsayısı ile, parçacıklar arasındaki en iyiye doğru yönelme ölçütü, dolayısıyla küresel en iyiye yönelme ölçütü ise c_2 katsayısı ile belirlenir ve değerleri genellikle 2 olarak alınır (Akbulut 2009). PSO'da oluşturulan

parçacıkların boyutuna göre $[0, 1]$ aralığındaki değerlerden oluşan matris, $\text{rand}(\cdot)$ matrisidir (Min vd., 2011). PSO, büyük ölçekli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini, gradyan azaltma tabanlı algoritmalara göre daha etkili bir şekilde çözdüğü için, bu makalede PSO temelli mod seçimi ve kaynak tahsisi şeması kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan, PSO tabanlı kaynak tahsisi ve mod seçimi algoritması için $m = 1, 2, \dots, M$ parçacık ve $2N$ alt kanal sayılı rastgele bir matris oluşturulmaktadır. $2N$ alt kanalın ilk yarısı hücrel modu kullanan kullanıcıları, ikinci yarısı ise D2D modunu kullanan kullanıcıları temsil etmektedir. Boyutu $M \times 2N$ olarak oluşturulan x_m^{2N} 'lik matristen $x_{k,n}^{(q)}$ kaynak tahsisi ve mod seçimi ataması için kullanılan matrise geçilir:

$$Q(x_m^n) = \lfloor x_m^n (K+1) \rfloor, \quad x_m^n \in (0,1), \quad (6)$$

$$Q(x_m^{N+n}) = \lceil x_m^{N+n} (D+1) \rceil + N_K, \quad x_m^{N+n} \in (0,1). \quad (7)$$

Burada, $\lfloor \cdot \rfloor$ taban operatörü kendisinden küçük en büyük tamsayıya, $\lceil \cdot \rceil$ tavan operatörü ise kendisinden büyük en küçük tamsayıya yuvarlama yapan matematiksel fonksiyonlardır. (6) ve (7) yardımıyla $Q(x_m^n)$, 0 ve K arasında bir değer, $Q(x_m^{N+n})$ ise $N_K + 1$ ile $K + 1$ arasında bir değer çıkmaktadır. $Q(x_m^n)$, $Q(x_m^{N+n})$ değerlerinden (8) kullanılarak, n . alt kanala k . kullanıcı atanmışsa 1 , atanmamışsa 0 'lardan oluşan bir $x_{k,n}^{(q)}$ matrisi elde edilmektedir. Elde edilen $x_{k,n}^{(q)}$ matrisinin boyutu $M \times 2N'$ 'dir:

$$x_{k,n}^{(q)} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k = Q(x_m^n) \text{ ve } q = 0 \\ 1, & \text{eğer } k = Q(x_m^{N+n}) \text{ ve } q = 1 \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases} \quad (8)$$

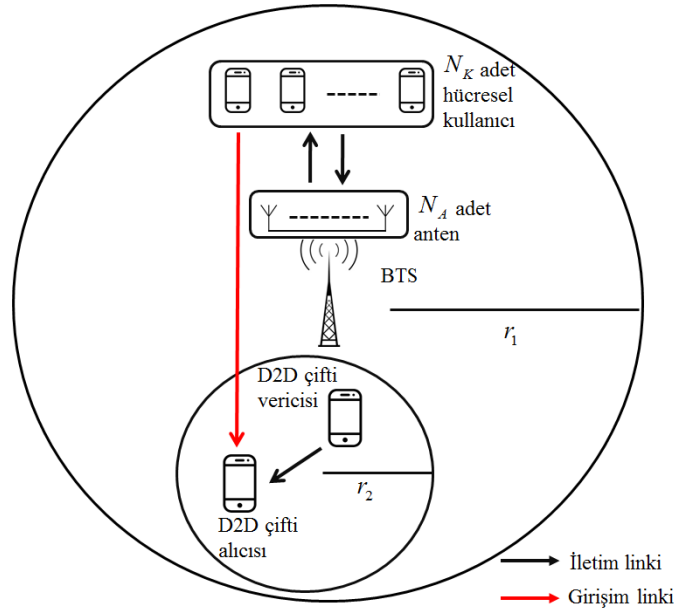
PSO tabanlı kaynak tahsisi ve mod seçimi tamamlandıktan sonra elde edilen $r_{k,n}^{(q)}$ matrisi, (9) ile verilen uygunluk fonksiyonu için kullanılır. U , uygunluk fonksiyonunun temel amacı toplam kullanıcı hızını en yüksek seviyeye getirmektir,

$$U = \sum_k \sum_n \sum_q x_{k,n}^{(q)} r_{k,n}^{(q)}. \quad (9)$$

PSO tabanlı kaynak tahsisi ve mod seçimi işleminde birtakım sınırlamalar yapılmaktadır: Bu kısıtlamalar, hücrel kullanıcıların $q = 1$ modunu kullanamaması, D2D çiftinin diğer bir D2D çiftiyle aynı alt kanalı kullanması sonucu oluşan girişimi önlemek için her alt kanalda sadece bir tane D2D çiftinin bulunması, hücrel kullanıcı ve D2D çiftlerinin bir tane mod seçebilmesi, OFDMA sonucu oluşturulan alt kanalları en fazla bir hücrel kullanıcı ve bir D2D çiftinin kullanabilmesi şeklinde sıralanmaktadır.

4. Girişim Sınırlı Alan Sistem Modeli (Interference Limited Area System Model)

Bu çalışmada ikinci olarak, N_K adet hücrel kullanıcı ve 1 adet D2D çiftinin bulunduğu tek hücreli bir sistem tasarlanmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü üzere, hücrel kullanıcılar N_A adet anten ile donatılmıştır. Önerilen model için MIMO sistem tercih edilmektedir. İletimde yukarı link fazındaki girişimler dikkate alınmaktadır. Aşağı link fazında oluşan girişimin huzmeleme ile yok edildiği kabul edilmektedir (Zhang ve Liang 2008). Oluşturulan sistem modelinde kanalın ortalama gücü 1 olarak alınmıştır. $P_a = c (d_a)^{-\alpha} P_0$ yol kaybı modeli olarak kullanılmıştır. Burada P_0 iletim gücü ve P_a vericiden d_a kadar uzaklıkta ölçülen işaretin gücü olarak tanımlanmıştır (Rappaport 2001). Yol kaybı katsayısı $c = 0.1$ ile, yol kaybı üssü ise α ile temsil edilmiştir (Jiang vd., 2016). $P_{\text{HK}_i, \text{BTS}}$ i . hücrel kullanıcının ($i \in 1, 2, \dots, N_K$) BTS'den aldığı ortalama gücü, $d_{\text{HK}_i, \text{BTS}}$ i . hücrel kullanıcı ile BTS arasındaki mesafeyi ifade etmek üzere, P_{HK_i} i . hücrel kullanıcının iletim gücünü göstermektedir. $P_{\text{HK}_i, \text{BTS}} = c (d_{\text{HK}_i, \text{BTS}})^{-\alpha} P_{\text{HK}_i}$ ile ifade edilmektedir.



Şekil 2. Girişim sınırlı alan sistem modeli (Interference-limited area system model)

Öte yandan, i . hücreyel kullanıcının D2D alıcısında oluşturduğu girişim gücü $I_{HK_i,D2D_R} = c(d_{HK_i,D2D_R})^{-\alpha} P_{HK_i}$ ile tanımlanmaktadır. Burada, $d_{HK_i,D2D_R}$, i . hücreyel kullanıcı ile D2D alıcısı arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Gerekli düzenlemelerin ardından aşağıdaki sonuca ulaşılır:

$$I_{HK_i,D2D_R} = \left(\frac{d_{HK_i,D2D_R}}{d_{HK_i,BTS}} \right)^{-\alpha} P_{HK_i,BTS} \quad (10)$$

$I_{D2D_T,BTS}$ D2D çifti vericisinin BTS'de oluşturduğu girişim gücünü göstermekte ve $I_{D2D_T,BTS} = c(d_{D2D_T,BTS})^{-\alpha} P_{D2D_T}$ ile tanımlanmaktadır. D2D çifti vericisi ile BTS arasındaki mesafe $d_{D2D_T,BTS}$ ile, D2D çifti vericisinin iletim gücü ise P_{D2D_T} ile tanımlanmaktadır. $P_{D2D_T,D2D_R}$, D2D çifti vericisi ile D2D çifti alıcısı bağlantısının ortalama gücünü ve $d_{D2D_T,D2D_R}$, D2D çifti vericisi ile D2D çifti alıcısı arasındaki mesafeyi göstermek üzere $P_{D2D_T,D2D_R} = c(d_{D2D_T,D2D_R})^{-\alpha} P_{D2D_T}$ ile ifade edilmektedir. Buradan, matematiksel düzenlemelerle $P_{D2D_T,D2D_R} = I_{D2D_T,BTS} \left(d_{D2D_T,BTS} / d_{D2D_T,D2D_R} \right)^{\alpha}$ sonucuna ulaşılır. D2D çifti vericisinin hücreyel kullanıcılarda oluşturduğu girişimi önlemek için D2D çifti vericisindeki güç değeri δ_B ile sınırlandırılmıştır. δ_B , D2D çifti vericisinin hücreyel kullanıcılarda oluşturduğu girişimin eşik değerini belirtmektedir ve $(I_{D2D_T,BTS} / P_{HK_i,BTS}) \leq \delta_B$ ile tanımlanmaktadır. Burada, $I_{D2D_T,BTS}$, yukarıda elde edildiği şekliyle, $P_{D2D_T,D2D_R} \left(d_{D2D_T,BTS} / d_{D2D_T,D2D_R} \right)^{-\alpha}$ kullanıldığında,

$$P_{D2D_T,D2D_R} \leq \left(\frac{d_{D2D_T,BTS}}{d_{D2D_T,D2D_R}} \right)^{\alpha} \delta_B P_{HK_i,BTS} \quad (11)$$

matematiksel forma ulaşılır. Bu yolla hücreyel kullanıcıların, D2D çifti alıcısında neden olduğu girişim, girişim sınırlı alan kullanılarak azaltılmıştır. Girişim sınırlı bu alanda, hücreyel kullanıcıların kullandığı alt kanalı D2D çifti yeniden kullanamamaktadır. Girişim sınırlı alan oluşturulurken, belirli varsayımlar göz önünde bulundurulmaktadır: BTS'nin, kullanıcıların konum bilgisini bildiği ve her kullanıcı için girişim seviyesini aynı yol kaybı üssü ile hesapladığı düşünülmüştür.

Hücreyel kullanıcısının D2D alıcısında oluşturduğu girişim $I_{R_i} = (I_{HK_i,D2D_R} / P_{D2D_T,D2D_R}) > \delta_D$ ile ifade edilmektedir. Girişim sınırlı alan oluşturulurken, hücreyel kullanıcının D2D alıcısında meydana getirdiği girişimin eşik değeri ise δ_D ile verilmektedir. Gerekli düzenlemelerin ardından (12)'ye ulaşmaktadır:

$$I_{\text{HK}_i, \text{D2D}_R} = \left(\frac{d_{\text{HK}_i, \text{BTS}}}{d_{\text{HK}_i, \text{D2D}_R}} \right)^\alpha P_{\text{HK}_i, \text{BTS}} > \delta_D P_{\text{D2D}_T, \text{D2D}_R} \quad (12)$$

Hücrel kullanıcılardan herhangi birinin koordinatı $L_i = (x_i, y_i)$, D2D alıcısının koordinatı ise $L_{\text{D2D}_R} = (x_j, y_j)$ olarak tanımlanmıştır. İki nokta arası uzaklık hesaplamasından, hücrel kullanıcılardan herhangi birinin, BTS ile olan uzaklığı $d_{\text{HK}_i, \text{BTS}} = \sqrt{(x_i - 0)^2 + (y_i - 0)^2}$ ile, D2D çifti ile olan uzaklığı ise $d_{\text{HK}_i, \text{D2D}_R} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ olarak belirtilmektedir. $d_{\text{HK}_i, \text{BTS}}$ ve $d_{\text{HK}_i, \text{D2D}_R}$ (12)'de yerine konduğunda,

$$\left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right)^{\alpha/2} P_{\text{HK}_i, \text{BTS}} > \delta_D P_{\text{D2D}_T, \text{D2D}_R} \quad (13)$$

elde edilmektedir. Burada, $(\delta_D P_{\text{D2D}_T, \text{D2D}_R} / P_{\text{HK}_i, \text{BTS}})^{2/\alpha} = A$ olarak alınmış ve $A > 1$ kabul edilmiştir. Çünkü hücrel kullanıcıların dâhil edilmediği alan ne kadar küçük olursa, kapasite kaybı da o kadar azalmaktadır. Bu durumda (13)'ün yeniden düzenlenmesi ile (14) elde edilmektedir:

$$\left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right) > A. \quad (14)$$

Genel çember denklemi kullanılarak ve (14)'ün yardımıyla, girişim sınırlı alanın dairesel yarıçapı $r_2 = \sqrt{(Ax_j^2 + Ay_j^2)/(A-1)^2}$ ve daire merkezi $((Ax_j/A-1), (Ay_j/A-1))$ olarak bulunmaktadır (Agnew 1962). N_K hücrel kullanıcıların, N'_K ise girişim sınırlı alanda D2D çiftinin kanalını yeniden kullanmak için seçilebilecek hücrel kullanıcıların sayısını göstermektedir. $\text{Pr}(\cdot)$, I_{R_i} 'nin δ_D 'den küçük olma olasılığını tanımlamak üzere, N'_K ,

$$N'_K = \left[N_K \left(1 - P_r(I_{R_i} < \delta_D) \right) \right] = \left[N_K \left(1 - \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} \right) \right] \quad (15)$$

şeklinde elde edilmektedir. Hücrel kullanıcıların D2D çiftlerine oluşturduğu girişim değeri, belirlenen δ_D eşik değerinden az olmalıdır. Öte yandan, hücrel kapsama alanının yarıçapı r_1 ile temsil edilmektedir. R_{GSA} , girişim sınırlı alanın hücrel alana oranını ifade etmek üzere, N'_K son olarak,

$$N'_K = N_K (1 - R_{\text{GSA}}) = N_K \left(1 - \frac{Ax_j^2 + Ay_j^2}{(A-1)^2 r_1^2} \right) \quad (16)$$

şeklinde tanımlanabilir. Yukarıda $(P_{\text{D2D}_T, \text{D2D}_R} / P_{\text{HK}_i})$ 'nin yerine (11) kullanılarak $\delta_D \delta_B (d_{\text{D2D}_T, \text{BTS}} / d_{\text{D2D}_T, \text{D2D}_R})^\alpha = A^{\alpha/2}$ eşitliği elde edilmektedir. Buradan, $\delta_D = \frac{A^{\alpha/2}}{\delta_B} (d_{\text{D2D}_T, \text{BTS}} / d_{\text{D2D}_T, \text{D2D}_R})^\alpha$ şeklinde hesaplanmaktadır.

D2D çiftinin, hangi hücrel kullanıcıların kanalını yeniden kullanacağını seçimi için yarı ortogonal kullanıcı seçim algoritmasından yararlanılmıştır (Min vd., 2011). Yarı ortogonal kullanıcı seçimi algoritması, aday setindeki yarı dikey kullanıcılar arasında en iyi metriğe sahip kullanıcıyı seçmek ve bir sonraki yineleme için verileri güncellemekten oluşan bir optimizasyon algoritmasıdır. Kullanıcıların yarı dikey olup olmadığı $\cos \theta = \frac{\bar{a} \bar{b}}{|a||b|}$

eşitliğindeki gibi iki vektörün çarpımı sonucunda tespit edilir. Burada a ve b vektörleri, θ iki vektör arasındaki açıyı, $|\cdot|$ ise vektör modülünü temsil etmektedir (Yang vd. 2010). Yarı ortogonal kullanıcı seçim algoritması, yüksek hücrel kullanıcı sayılarında dahi, optimal kapasiteyi elde edebilmektedir. Bu algoritma da kapasite,

seçilecek hücrel kullanıcıların sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Girişim sınırlı alan olmadığı varsayılırsa, hücrel kullanıcılar için elde edilen kapasite (17)'de verilmektedir (Yoo ve Goldsmith 2006):

$$C_{HK} = N_A \log_2(1 + P_{HK_i,BTS} \log N_K). \quad (17)$$

D2D kullanıcıları, hücrel kaynakları yeniden kullanmak amacıyla girişim sınırlı alan dışından, hücrel kullanıcı seçmektedir. Bu sınırlı alanda bulunan hücrel kullanıcılar, yarı ortogonal kullanıcı seçimi adayları dışında kalmaktadır. Bu durum aşağıda $C_{kayıp}$ ile tanımlanan kapasite kaybına sebep olmaktadır (Yoo ve Goldsmith 2006):

$$C_{kayıp} = N_A \log_2 \left(\frac{1 + P_{HK_i,BTS} \log_2 N_K}{1 + P_{HK_i,BTS} \log_2 N'_K} \right). \quad (18)$$

Yarı ortogonal kullanıcı seçimi algoritmasında seçilen hücrel kullanıcılar için, en kötü senaryoda girişim sınırlı alanın kenarında olduğu varsayılarak, D2D çiftinin kullanılan kapasite değeri,

$$C_{D2D} = \frac{1}{\ln 2} \left[\frac{1}{N_A} + \frac{(1 - \delta_D)}{N_A + 1} + \frac{(1 - \delta_D)^2}{N_A + 2} + \frac{(1 - \delta_D)^3}{N_A + 3} + \dots \right] \quad (19)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Min vd., 2011). Toplam kapasite değeri ise $C_{toplam} = C_{HK} + C_{D2D}$ ile bulunmaktadır ve kullanıcı hızı cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Ghavami vd., 2004). Toplam kullanıcı hızı ν ile band genişliği ise B ile ifade edilmektedir:

$$C_{toplam} (bps / Hz) = \frac{\nu (Mbps)}{B (MHz)}. \quad (20)$$

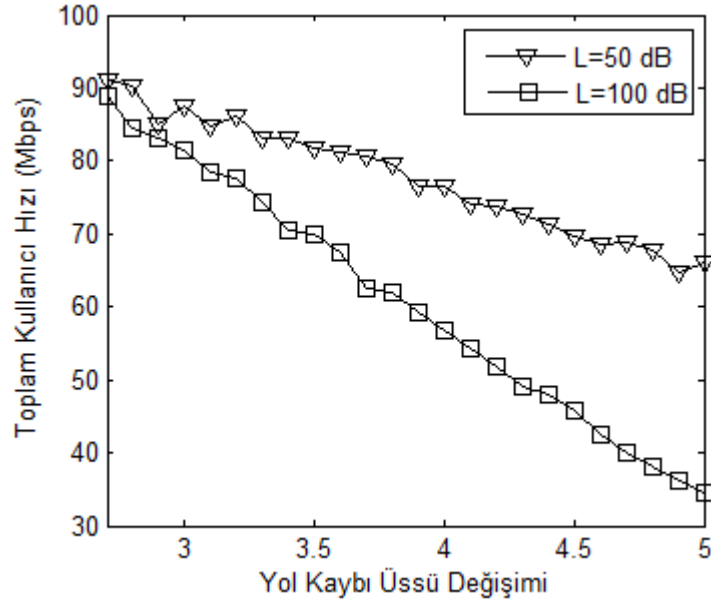
5. Nümerik Sonuçlar (Numerical Results)

Kaynak tahsisi ve mod seçimi ile girişim sınırlı alan sistem modelleri için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

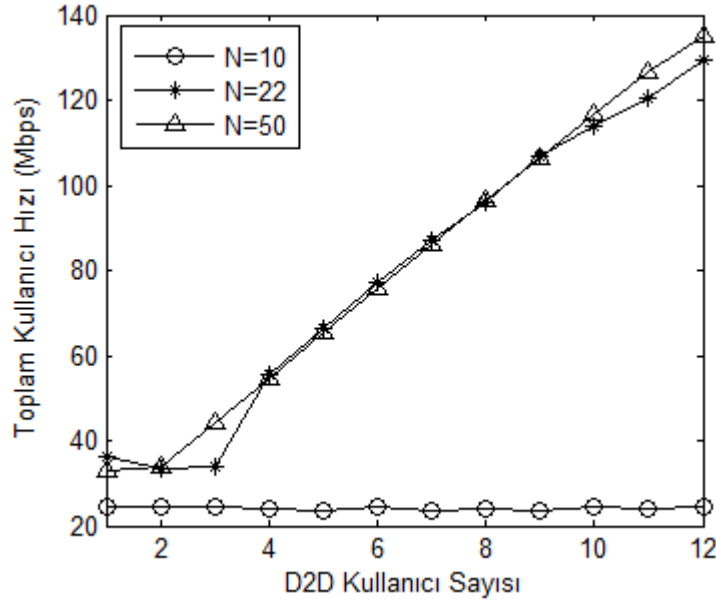
Tablo 1. Sistem model parametreleri (System model parameters)

r_1	500 m	$d_{D2D_T, D2D_R}$	15 m
B	3 MHz	N_A	4
δ_B	0.1	BTS'nin maksimum iletim gücü ($P_{k,n}^{BTS,max}$)	36 dBm
P_{HK_i}	10 dB	D2D maksimum iletim gücü ($P_{k,n}^{D2D,max}$)	17 dBm
R_{GSA}	0.8	Gürültü yoğunluğu (P_n)	-174 dBm/Hz
$d_{D2D_R, BTS}$	250 m	M	30

Şekil 3'te, 10 tane D2D çifti ve 10 tane hücrel kullanıcının bulunduğu tek hücreli bir sistem modeli incelenmiş ve iki farklı yol kaybı değeri için ($L = 50$ dB, 100 dB) α değişimine göre toplam kullanıcı hızı gösterilmiştir. $N = 20$ olarak alınmıştır. Yol kaybı değeri, $L = 50$ dB için toplam kullanıcı hızında 91 Mbps'den 66.22 Mbps'ye kadar %26.97'lik bir düşüş gerçekleşirken, yol kaybı değeri $L = 100$ dB için 88.82 Mbps'den 34.55 Mbps'ye kadar %61.10'luk bir düşüş gerçekleşmiştir. $L = 100$ dB için elde edilen toplam kullanıcı hızı daha fazla bozulmaya uğramaktadır. Aynı zamanda şekilden, α değerinin artması ile toplam kullanıcı hızındaki azalma da gözlenmektedir.



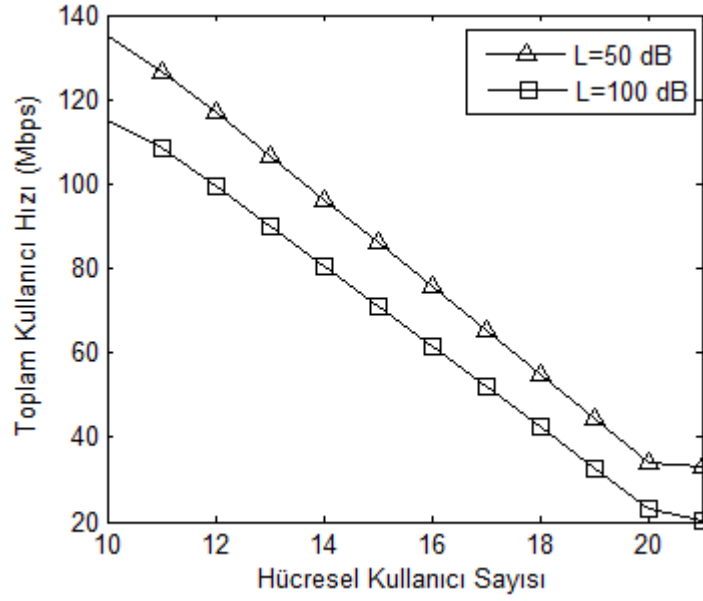
Şekil 3. Toplam kullanıcı hızının α ile değişimi (The variation of total throughput with α)



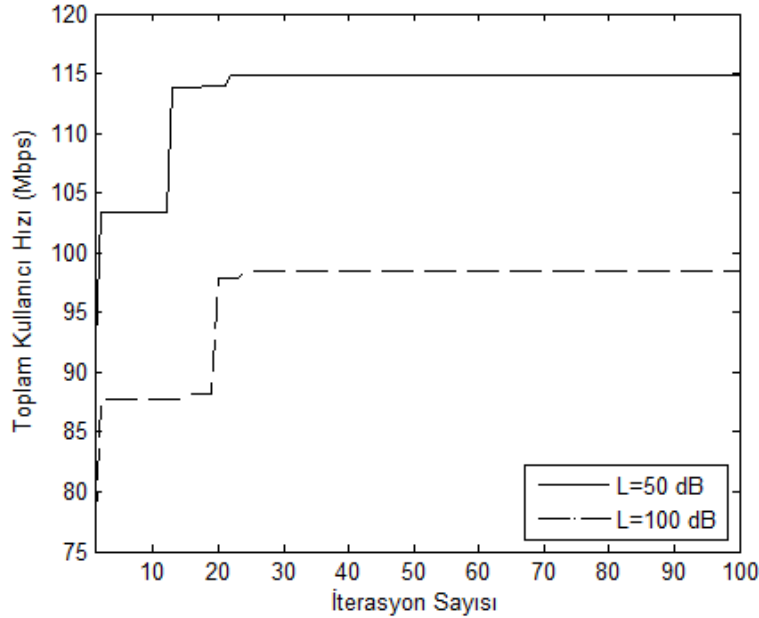
Şekil 4. Toplam kullanıcı hızının D2D kullanıcı sayısı ile değişimi (The variation of total throughput with the number of D2D users)

Hüresel kullanıcı ve D2D çifti sayısının $K=22$ alındığı, D2D çiftinin 1'den başlayıp 12'e kadar artarak devam ettiği tek hücreli bir sistem modeli için incelenmiş ve üç farklı alt kanal değeri için ($N=10, 22, 50$) toplam kullanıcı hızı değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. $\alpha=4$ olarak alınmıştır. D2D çifti sayısı arttıkça toplam kullanıcı hızı artmaktadır. Şekilde, telsiz haberleşme kullanıcıları tarafından talep edilen yüksek hızın D2D çifti kullanımı sonucu elde edilebileceği gözlenmiştir. Aynı zamanda alt kanal sayısı toplam kullanıcı sayısından düşük olduğunda, toplam kullanıcı hızında ciddi anlamda bir düşüş görülmektedir. Alt kanal sayısı $N=10$ olarak alındığında, D2D çifti fazla girişim oluştuğunda bile hüresel kullanıcının kaynağını kullanmaktadır. Bu nedenle D2D çifti arttığı halde toplam kullanıcı hızı artmamaktadır.

Toplam kullanıcı sayısının, $K=22$ alındığı hüresel kullanıcı sayısının 10'dan başlayıp 21'e kadar artarak devam ettiği tek hücreli bir sistem modeli de incelenmiş ve iki farklı yol kaybı değeri için ($L=50$ dB, 100 dB) toplam kullanıcı hızı değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir. $N=50$, $\alpha=4$ olarak alınmıştır. Hüresel kullanıcı sayısı artarken, D2D çifti sayısında düşüş olduğundan, toplam kullanıcı hızında azalma gözlenmiştir.



Şekil 5. Toplam kullanıcı hızının hücresel kullanıcı sayısına göre değişimi (The variation of total throughput according to the number of cellular users)

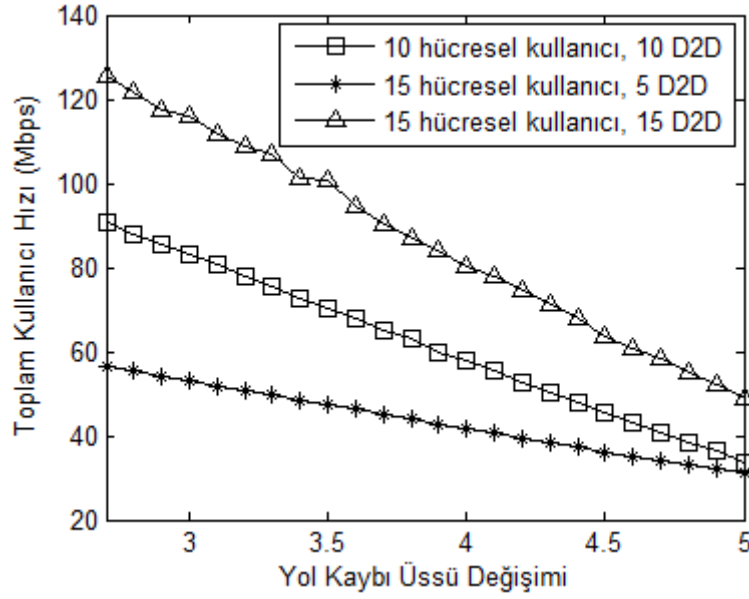


Şekil 6. Toplam kullanıcı hızının iterasyon sayısı ile değişimi (The variation of total throughput with the number of iterations)

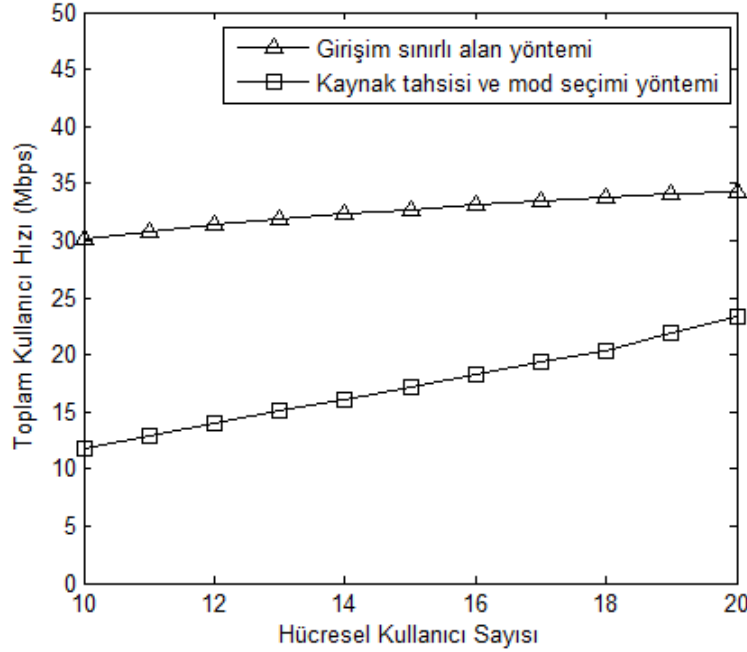
Şekil 6'da 10 tane D2D çifti ve 10 tane hücresel kullanıcının bulunduğu tek hücreli bir sistem modeli incelenmiş ve iki farklı yol kaybı değeri için ($L=50$ dB, 100 dB) iterasyon sayısına göre toplam kullanıcı hızı değişimi verilmiştir.

$N=25$, $\alpha=4$ olarak alınmıştır. Şekil 6'da iterasyon sayısının artması ile toplam kullanıcı hızının arttığı ve belirli bir iterasyondan sonra da toplam kullanıcı hızının sabit kaldığı görülmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, $L=100$ dB için toplam kullanıcı hızı bozulması, $L=50$ dB için gözlemlenen bozulmadan daha fazladır.

Hücresel kullanıcı sayıları ve D2D çifti sayılarının farklılık gösterdiği üç farklı tek hücreli sistem modeli için, toplam kullanıcı hızının yol kaybı üssüne göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir. $N=20$ olarak alınmıştır. Şekilde, hücresel kullanıcı ve D2D çifti sayılarının sırası ile (10, 10) ve (15, 5) olduğu bu iki durumda, toplam kullanıcı sayısı aynı olmasına rağmen, D2D çifti sayıları birbirinden farklı olarak planlanmıştır. Hücresel kullanıcı sayısı 15, D2D çifti sayısı bundan daha az olduğunda ve 5 olarak tanımlandığında, toplam kullanıcı hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4'te elde edilen sonuçla örtüşür şekilde, D2D çifti sayısı azaldıkça toplam kullanıcı hızı da azalmaktadır. Hücresel kullanıcı sayısı 15, D2D kullanıcı sayısı 15 olan bir senaryo için, kullanıcı sayısı arttığından, toplam kullanıcı hızı da artmıştır.



Şekil 7. Farklı kullanıcı sayılarında yol kaybı üssüne göre toplam kullanıcı hızı değişimi (The variation of total throughput according to the path loss exponent for different numbers of users)



Şekil 8. Kaynak tahsisi ve mod seçimi ile girişim sınırlı alan sistem modelleri için toplam kullanıcı hızının hücreli kullanıcı sayısına göre değişimi (The variation of total throughput according to the numbers of cellular users for the Interference-limited area system model with the resource allocation and mode selection)

PSO tabanlı kaynak tahsisi mod seçimi sistem modelinde D2D çifti sayısı 1, hücreli kullanıcı sayısı ise 10 ile 20 arasında artacak şekilde ayarlanmıştır. $N=30$ ve $\alpha=4$ olarak alınmıştır. Girişim sınırlı alan sistem modelinde ise, yine D2D çifti sayısı 1 ve hücreli kullanıcı sayısı 10 ile 20 arasında artacak şekilde tanımlanmıştır. Kaynak tahsisi ve mod seçimi ile girişim sınırlı alan sistem modellerinin toplam kullanıcı sayısına göre değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir.

PSO algoritması ile gözlemlenen başarımın elde edilen en iyi sonuca göre değil, çözüm olarak sunulan algoritmanın birden çok defa çalıştırılarak, ne kadar sıklıkla aynı değer elde edildiği ile ilgili olduğu bilinmektedir. Bu çalışma için de elde edilen nümerik sonuçlar, en iyi sonuca göre değil, döngünün 10 kez tekrar edilmesi sonucu ulaşılan değerleridir.

6. Sonuçlar ve Yorumlar (Conclusions and Comments)

Bu çalışmada, D2D çiftleri, hücresele kullanıcılar, D2D çifti ile hücresele kullanıcılar arasındaki girişim problemlerini minimize etmek amacıyla, girişim sınırlı alan ile kaynak tahsisi ve mod seçimi yöntemleri kullanılmış ve her iki yaklaşım için önerilen sistem modellerinin performansı karşılaştırılmıştır. Toplam kullanıcı hızını etkileyen, kullanıcı sayısı, yol kaybı üssü, yol kaybı değeri, iterasyon sayısı, alt kanal sayısı gibi faktörler değerlendirilmiştir. Girişim sınırlı alan sistem modelinde, hücresele kullanıcı sayısı arttıkça, yarı ortogonal kullanıcı seçim algoritmasında seçilecek aday sayısı arttığından toplam kullanıcı hızı daha da artış göstermiştir. PSO algoritmasından yararlanan kaynak tahsisi ve mod seçimi sistem modelinde ise hücresele kullanıcı sayısı arttığında, toplam kullanıcı hızı artmıştır. İki sistem modelinde de hücresele kullanıcı sayısı arttığında, toplam kullanıcı sayısı artmıştır. D2D çiftinin en az girişime neden olan hücresele kullanıcının kanalını yeniden kullanması durumu, girişim sınırlı alan modelinde, kaynak tahsisi ve mod seçimi modeline göre daha yüksek toplam kullanıcı hızı başarımı elde edilmesine yardımcı olmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Agnew R. P., 1962. *Calculus, Analytic Geometry and Calculus, with Vectors*. McGraw-Hill Book Company.
- Akbulut İ., 2009. *Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Anten Tasarımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Asadi A., Mancuso V., and Wang Q., 2014. A survey on device-to-device communication in cellular Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(4), 1801–1819.
- Basgumus A., Namdar M., Yılmaz G., and Altuncu A., 2015. Performance Comparison of the Differential Evolution and Particle Swarm Optimization Algorithms in Free-Space Optical Communications Systems. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 15(2), 17–22.
- Chen L., Chen X., Yang D., Zeng M., and Zhang X., 2012. Downlink Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 232–237.
- Deng H., Ge N., and Tao X. M., 2012. Joint Mode Selection and Resource Allocation for Cellular Controlled Short-Range Communication in OFDMA Networks. *IEEE Transactions on Communications*, E9 5-B (3), 1023- 1026.
- Engin B., 2015. *Klasik ve ağ kodlamalı OFDMA sistemlerde alt-taşıyıcı atama*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ghavami M., Kohno R., and Michael L.B., 2004. *Ultra wideband signals and systems in communication Engineering*. Wiley.
- Hou X., Liu F., and Liu Y., 2017. Capacity gain analysis for underlying full-duplex D2D communications with a novel interference management scheme. *28th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1–5.
- Jiang Y., Liu Q., Zheng F., Gao X., and You X., 2016. Energy efficient joint resource allocation and power control for D2D communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65 (8), 6119–6127.
- Mahmood K., 2014. *Mode Selection Rules For Device to Device Communications: Design Criteria and Performance Metrics*, M.Sc. thesis, İstanbul Technical University, İstanbul.
- Min H., Lee J., Park S., and Hong D., 2011. Capacity Enhancement Using an Interference Limited Area for Device-to-Device Uplink Underlying Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10 (12), 3995–4000.
- Mingan Y., and Cetin B. K., 2017. Comparing resource sharing methods for device-to-device communication in cellular Networks. *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4.
- Pang H., Wang P., Wang X., Liu F., and Van N. N., 2013. Joint mode selection and resource allocation using evolutionary algorithm for device-to-device communication underlying cellular networks. *Journal of Communication*, 8 (11), 751–757.
- Rappaport T., 2001. *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall.
- Su L., Ji Y. S., Wang P., and Liu F. Q., 2013. Resource allocation using particle swarm optimization for D2D communication underlay of cellular networks. in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 129 -133.
- Sun S., and Shin Y., 2014. Resource Allocation for D2D Communication Using Particle Swarm Optimization in LTE Networks. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, 371–376.
- Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), 1998. Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS. 3GPP TR 30. 03U, version 3. 2. 0.
- Wachowiak M. P., Smolikova R., Zheng Y. F., Zurada J. M., and Elmaghraby A. S. (2004). An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8, pp. 289–301.
- Yoo T., and Goldsmith A., 2006. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24 (3), 528–541.
- Zhang R., and Liang Y. C., 2008. Exploiting multiantennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing (JSTSP)*, 2 (1), 88–102.



COMPARATIVE STUDY OF PHOTOVOLTAIC ARRAY OPTIMUM TILT ANGLE AND ORIENTATION WITH MULTI-OBJECTIVE CONSIDERATION

Ali DURUSU^{1*}, Ali ERDUMAN², Fikret YILDIZ²

¹ Yıldız Technical University, Faculty of Electrical-Electronics, Department of Electrical Engineering, Istanbul, Turkey

² Hakkari University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Hakkari, Turkey

Keywords

Optimization,
Tilt Angle,
Orientation Angle,
Hybrid System.

Abstract

Photovoltaic (PV) solar energy system converts sunlight to electricity and referred as one of promising system for production of a renewable energy resources. Tilt angle and orientation have important effect on PV output. Positioning of PV system using tilt angle and orientation, therefore, according to path of radiation of sunlight is very critical to obtain more efficient energy conversion from PV panels. In this study, determination of optimum tilt angle and orientation studied for a grid-connected hybrid wind-PV-battery system. Firstly, general calculations of PV completed using a numerical method as follow: annual solar radiation (Wh/m²), annual energy production using radiation and temperature (Wh/m²), energy production using radiation, temperature and wind speed (Wh/m²). Secondly, cost of electricity for a grid-connected wind-PV-battery hybrid systems (\$/year) depending on solar radiation, weather conditions and electricity market data were obtained using numerical method. It founded that optimum tilt angle varied between 26° - 27° for first three scenario and for the last case is 9°. As for orientation, it changed from south to west for all cases. Moreover, it seems that results of this study might be a reference and preliminary study for scientist and researcher/engineers to simplify designing and evaluating PV system.

FARKLI DURUMLAR İÇİN FOTOVOLTAİK PANELLERİN OPTİMUM EĞİM VE AZİMUT AÇILARININ BELİRLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Anahtar Kelimeler

Optimizasyon,
Eğim Açısı,
Azimut Açısı,
Hibrit Sistem.

Öz

Fotovoltaik (PV) güneş enerji sistemleri, yenilenebilir enerji sistemleri arasında güneşe en bağımlı kaynaktır ve güneş ışınımı olduğunda enerji üretmektedir. PV sistemlerin tasarım ve analizlerinde en önemli gereksinim maksimum ışınımın PV panel yüzeyine düştüğü eğim ve azimut açısıdır. Bu çalışmada farklı durumlar için PV panellerin optimum eğim ve azimut açılarının hesaplanması için matematiksel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmadaki analizler ile optimum eğim ve azimut açılarının tespit edilmesinde; (1) eğimli yüzeydeki yıllık toplam ışınım (Wh/m²), (2) ışınım ve sıcaklığı temel alan yıllık enerji üretimi (Wh/m²), (3) ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızını temel alan yıllık enerji üretimi (Wh/m²), ve (4) şebekeye bağlı rüzgâr-PV-batarya-yük sisteminin yıllık toplam elektrik maliyetinin (\$/yıl) güneş ışınımı, hava verileri ve elektrik piyasası verileri ile hesaplanması dikkate alınmıştır. Bu çalışmadaki farklı durumlar için sonuçlar değişkenlik göstermektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar geleneksel olarak güneşe doğru olan yönlendirme durumu ile farklılık göstermektedir. Optimum eğim açısı ilk üç durum için 26° - 27° civarında iken son durum için 9° olarak elde edilmiştir. Optimum azimut açısı ise tüm durumlar için güneyden batıya doğru kaymıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, PV sistem tasarımı veya analizi yapacak mühendisler için faydalı olacaktır.

Alıntı / Cite

Durusu, A., Erduman, A., Yıldız, F., (2020). Comparative Study of Photovoltaic Array Optimum Tilt Angle and Orientation with Multi-Objective Consideration, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(4), 1031-1041.

* İlgili yazar / Corresponding author: adurusu@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5851

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Durusu, 0000-0002-8749-4570	Başvuru Tarihi / Submission Date	31.05.2020
A. Erduman, 0000-0003-4116-3159	Revizyon Tarihi / Revision Date	13.10.2020
F. Yıldız, 0000-0003-4846-3998	Kabul Tarihi / Accepted Date	12.11.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Introduction

Renewable energy sources studied intensively in recent years from academia and industry because insufficient amount of fossil fuel is remained for energy production in addition to its environmental effects. Therefore, researchers have turned their attention to more efficient utilization of renewable energy sources in recent years (Arikan et al., 2013). Photovoltaic (PV) systems introduced for renewable energy production and utilization of PV systems increased in proportional to energy demands (Kekezoglu et al., 2013). PV systems simply convert solar energy into electric power to provide electricity for areas where electric supply system is not available or connected to electrical grid for selling electricity back to grid (Zhou et al., 2015).

Determination of system performance for application areas is critical to find out optimum design of PV systems (Kacira et al., 2004). There are many parameters effecting output power of PV system, Tilt angle and orientation among other parameters are key factors for high yield energy from PV panels. Economic value of the produced electricity is another concern for optimal placement of PV system. Because produced energy from PV system does not perfectly synchronized with circulating load on electricity grid (Rhodes et al., 2014). Therefore, installation of the PV panel considering only production performance of panel might not be optimal design to achieve electricity that is more economical. Designing PV system by considering economic value of produced energy may require for shifting orientation from south to west. Such economic value based investigation of PV systems mentioned in (Rhodes et al., 2014).

There are several studies related to analytical modelling of PV arrays to obtain optimum tilt angle (Lewis, 1987; Elsayed, 1989; El-Kassaby, 1988; Bakirci, 2009; Binghamen, 2011). These studies summarized and more details can find about optimization of tilt angle of solar panel in (Yadav and Chandel, 2013). Moreover, researcher in this field also determined the optimum tilt angle of PV arrays using experimental results and measurements (Kaldellis and Zafirakis, 2012; Brinder et al., 2011; Nakamura et al., 2011; Wada et al., 2011; Hiraoka et al., 2003; Asl-Soleimani et al., 2001; John et al., 2012).

Majority of studies related with PV array mentioned that the optimum orientation of PV system to collect maximum radiation from sunrays would be southern orientation when northern hemisphere selected for installation. As for southern hemisphere, placement of PV system would be toward to northern orientation. This assumption is acceptable for the clear sky, however, variable weather conditions and non-uniform distribution of radiation due to fog or smog affects the optimal orientation of PV panel (Rhodes et al., 2014). Latitude is another important parameter on calculation of optimum tilt angle. This approximation ignores environmental conditions and gives valuable results, however, it has disadvantages when more accurate results are essential (Yadav and Chandel, 2013).

Two different methods mostly used to generate electricity from solar energy in Turkey. First is unlicensed solar plant with 1 MW maximum output power. Other is licensed solar power plant and it can generate electricity more than 1 MW. There are many unlicensed PV power plants having permission for installation, however, licensed solar plants established in Turkey for years (Minister of Energy and Natural Resources of Turkey, <http://www.enerji.gov.tr/en-US/Mainpage>).

In this study, wind-PV-battery hybrid model introduced and optimum tilt angle and orientation studied by considering output of PV panel using proposed model. A 1 m x 1m PV module surface chosen for calculation of optimum tilt angles and orientation by considering (1) annual solar radiation (Wh/m²), (2) annual PV production (Wh/m²) based on solar radiation and temperature, (3) annual PV production (Wh/m²) based on solar radiation, temperature and wind speed based. In addition to above-mentioned three cases, yearly electricity cost (\$/year) of wind-PV-battery hybrid system was also determined based on economic value. This study might provide valuable information to literature by comparing output of PV array with different optimum tilt angles and orientations. Section 2 includes description of methodology used in this study. Results of different approaches obtained and compared in Section 3 and Section 4 gives conclusion of this study.

2. Methodology

Determination of optimum tilt angle and orientation accomplished using five different data that obtained in Istanbul, Turkey: solar radiation from sun, ambient temperature, wind speed, hybrid system including wind turbine, battery system and PV array and price of generated electricity by considering different cases. As mentioned in introduction section of paper, maximum solar radiation, maximum output energy and placement of a PV panel with desired economic value are highly depend on the position of PV system according to sun rays. Therefore, effects of tilt angle and orientation on PV performance is main purpose of this study. Placement site, local economic data, environmental conditions are parameters that are determine optimum placement of a PV panel. Process steps of this study shown in Figure 1.

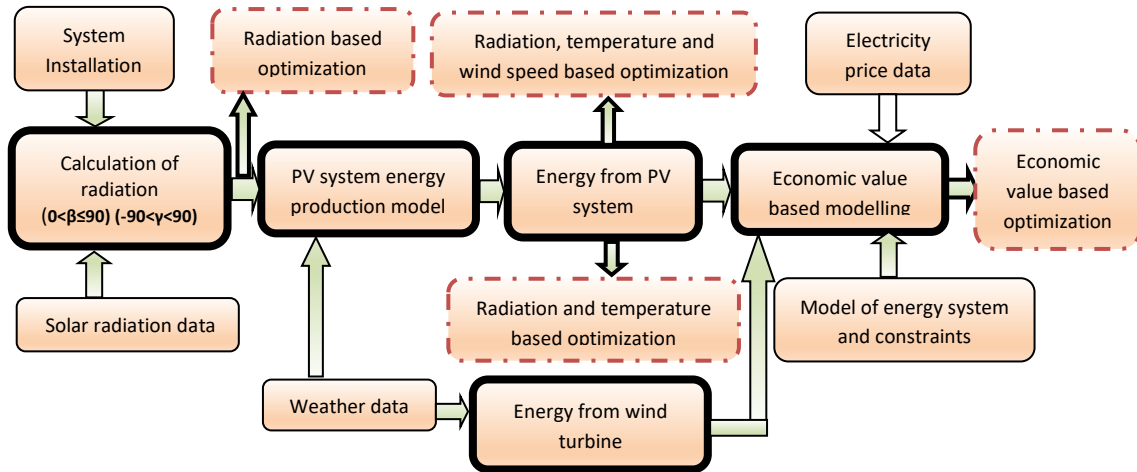


Figure 1. Process steps used in this study

The methodology consists of three parts; (1) calculation of total solar radiation on a panel, (2) modelling of grid-connected hybrid system including wind, PV and battery and (3) modeling of a PV system considering economic value of produced energy. In order to use the methodology proposed in this study, a case study has been determined for Istanbul-Turkey. Optimum tilt and orientation angles for different cases calculated using a program written in MATLAB.

2.1. Solar Radiation Model

The total radiation (I) is depends on two different parameters: direct (I_b) and diffused (I_d) radiation. Sum of these two parameters give us total radiation as shown in Eq. (1). Diffused radiation has also relation with clearness index (k_T) of sky and k_T is inversely proportional with extraterrestrial radiation (I_0) and proportional with total radiation as described in Eq. (2)-(3) (Beckman and Duffie, 1980).

$$I = I_b + I_d \tag{1}$$

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & k_T > 0.80 \end{cases} \tag{2}$$

$$k_T = \frac{I}{I_0} \tag{3}$$

Isotropic sky model is commonly used method to calculate solar radiation on a tilted surface of PV panel. Similar to calculation of total radiation on a horizontally placed PV panel as mentioned in Eq. (1), sum of reflected, direct and diffused radiation is equals to total radiation on a tilted PV array (Liu and Jordan, 1963). More detail about calculation of total radiation on a tilted plane given as below. Field of view of the tilted surface in the sky is equals to diffused radiation. However, field of view of a tilted PV array surface to ground is proportional to reflected radiation. The relation between diffused and reflected radiation to total radiation is show in Eq. (4) (Kacira et al., 2004).

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \tag{4}$$

where β is the angle between ground and PV array, ρ is ground albedo (0.2), and R_b is normalization of beam radiation from a tilted surface to horizontal direction as shown in Eq. (5)-(7) (Beckman and Duffie, 1980).

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \tag{5}$$

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \tag{6}$$

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \tag{7}$$

where δ is the declination, φ is the local latitude coordinate (latitude of Istanbul = 41°), γ is the surface orientation, and ω is the hour angle.

2.2. Hybrid System Model

Hybrid system used in this study including wind turbine, PV, battery and public park area shown in Figure 2. This system connected to electric grid system to supply electricity. Wind turbine with a 2.4 kW power rating established on 30 m long tower at the public park area. Power curve of wind turbine used in this hybrid system calculated as shown in Figure 3. Energy production of the wind turbine obtained via look-up table according to the power curve given in Figure 3. Public park area selected for installation of hybrid system. Structure of PV electricity production model constructed considering two different scenarios. First based on PV production due to solar radiation and temperature. Second scenario of PV production model designed based on solar radiation, temperature and wind speed.

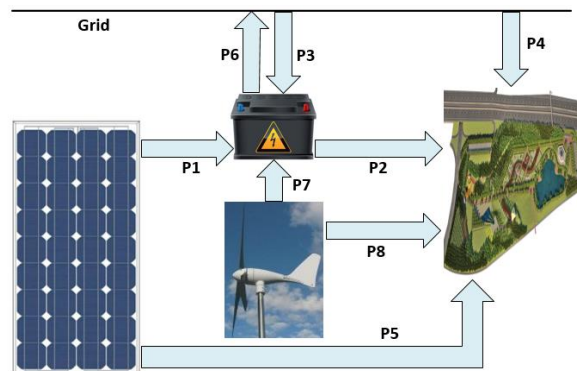


Figure 2. Grid connected hybrid system consist of a wind tribune, PV array, battery and public park area

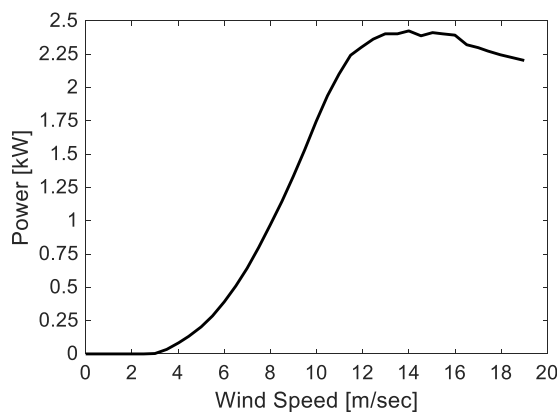


Figure 3. Power curve of the wind turbine with 2.4 kW rated power

Electricity production due to solar radiation and temperature modeled using Eq. (8) and Eq. (9) (Rhodes et al., 2014). DC to AC conversion efficiency and system losses ignored in this model.

$$P_{pv} = \eta_{pv} \eta_{other} I_T \tag{8}$$

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \left[1 - \beta_{ref} \left[T_a - T_{ref} + (T_{c,N} - T_N) \frac{I_T}{I_N} \right] \right] \tag{9}$$

where P_{pv} is PV power density (W/m^2), β_{ref} temperature coefficient of PV, η_{pv} is conversion ratio of PV panel, η_{other} is other factors (mismatch, wiring, connection, etc.) which are decrease conversion efficiency of PV system. This parameter is a constant with a value of 0.93. T_a is ambient temperature ($^{\circ}C$) and I_N is incident radiation ($800 W/m^2$) at normal operating condition temperature (Rhodes et al., 2014). The PV panel is made of mono-crystal and its properties given in Table 1.

Table 1. Properties of PV module

PROPERTIES	VALUE
Reference conversion ratio (η_{ref})	12%
Temperature coefficient (β_{ref}) (Chow, 2003)	0.0045
Reference temperature (T_{ref})	25 $^{\circ}C$
Nominal operating cell temperature ($T_{c,N}$) (Rhodes et al., 2014)	45 $^{\circ}C$
Nominal operating condition temperature (T_N) (Rhodes et al., 2014)	20 $^{\circ}C$

Cell temperature of PV array calculated using Eq. (10) and then wind speed is determined using this value (Tamizh et al., 2003; Ayaz et al., 2017; Durusu and Erduman, 2018).

$$T_c = 1.14(T_a - T_{ref}) + 0.0175(I_T - 300) - k_r w_s + 30 \tag{10}$$

where T_c is PV cell temperature ($^{\circ}C$), k_r is wind speed coefficient with a value of 1.509 and w_s is wind speed (m/sec). Calculation of T_c value and putting T_c into Eq. (9) is provides PV efficiency as described in Eq. (11).

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \left[1 - \beta_{ref} \left[T_a - T_{ref} + T_c - T_N \left(\frac{I_T}{I_N} \right) \right] \right] \tag{11}$$

Additional parameters of PV and battery are as following. Battery has 70 kWh capacity with a 85% charge and 100% discharge efficiency. Battery’s depth of discharge accepted as 50% and battery’s initial state of charge is 40 kWh. As for PV array, its maximum capacity is 20 kW. Annual solar radiation, ambient temperature and wind speed variation in Istanbul, Turkey shown in Figure 4.

2.3. Economic Value Model

Modeling of economic value based energy production proposed to minimize cost of electricity for hybrid system. Optimal control method applied to increase efficiency of hybrid system to obtain most efficient power flows of hybrid system with an advantage of minimum cost and maximum benefit. As described in Eq. (13) and Eq. (16)-(21), objective function and constrains are linear functions, therefore, power flow control can be described as linear programming problem is best fitted approach to solve power flow control problem as given in Eq. (12) (Zhou et ai., 2015).

$$\min f(x), s.t \begin{cases} Ax \leq b \\ A_{eq} x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \tag{12}$$

where $f(x)$ is objective function, A and b are inequality coefficient, A_{eq} and b_{eq} are denotes equality coefficient, lb and ub refers to upper and lower bounds of variables, respectively (Zhou et al., 2015). There are constrains for

proposed energy economic model. First related to cost of electricity used from electrical grid. Second constrain is income of electricity as supply to the electrical grid. System wear cost is third constrains of model. The daily cost of electricity formulated as in Eq. (13) and it assumed as objective function (Zhou et al., 2015).

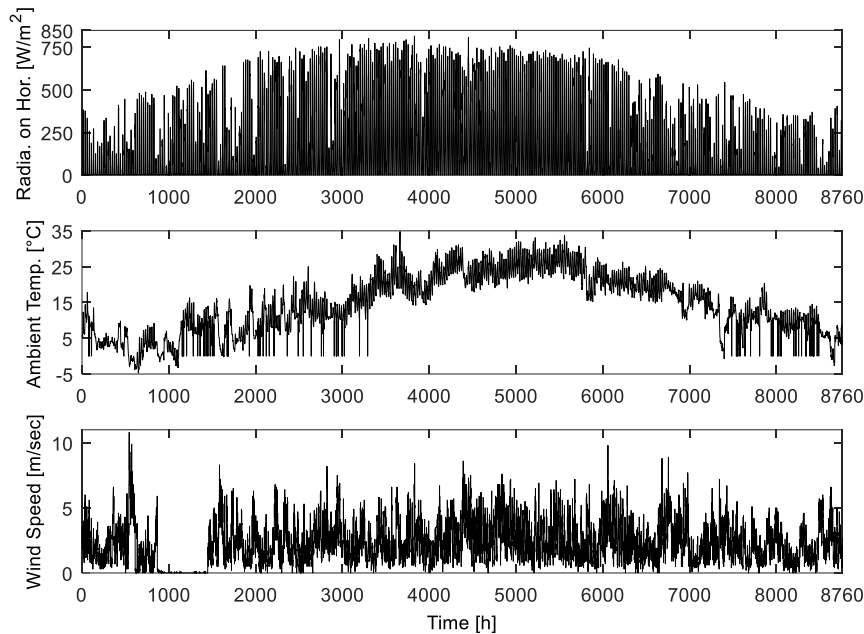


Figure 4. Annual variation of solar radiation, ambient temperature and wind speed in Istanbul

$$J = \sum_{t=0}^{23} p(t) [P_3(t) + P_4(t)] - \sum_{t=T_p} r_p p_p P_6(t) + C_h \tag{13}$$

$$C_h = \sum_{t=0}^{23} \alpha [P_2(t) + P_6(t)] + 24\sigma \tag{14}$$

where $p(t)$ is electricity selling price, p_p is electricity selling price in peak load period, r_p is contracted ratio of the peak price (0.65), C_h is wear cost of the system, α is battery wear cost coefficient (0.001) and σ is wear cost of other components (0.002) (Zhou et al., 2015). Daily electricity price variation with all taxes given in Eq. (15) (Electricity price, <http://gazelektrik.com/enerji-piyasalari/elektrik-fiyatlari#uc-zamanli>).

$$p(t) = \begin{cases} p_p, & t \in T_p, \quad T_p = [17, 22) \\ p_o, & t \in T_o, \quad T_o = [22, 06) \\ p_s, & t \in T_s, \quad T_s = [06, 17) \end{cases} \tag{15}$$

where $p_p = 0.2154$ \$/kWh is the price in peak load period; $p_o = 0.0770$ \$/kWh is the price for the off-peak period; $p_s = 0.1423$ \$/kWh is the price for the standard period. Considering above-mentioned parameters, control variables in objective function have to satisfy several constraints as shown in following equations (Zhou et al., 2015; Akdemir et al., 2018):

1- PV output power constraint:

$$P_1(t) + P_5(t) \leq P_{pv}(t) \tag{16}$$

2- Wind turbine output power constraint:

$$P_7(t) + P_8(t) \leq P_{wt}(t) \tag{17}$$

3- Power balance constraint (P_1 is load demand):

$$P_2(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_8(t) \leq P_1(t) \quad (18)$$

4- Battery state-of-charge constraint (S is battery state-of-charge):

$$S^{\min} \leq S(t) \leq S^{\max} \quad (19)$$

5- Power flow constraint:

$$0 \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (20)$$

6- State-of-charge terminate constraint:

$$S(0) \leq S(24) \quad (21)$$

Figure 5 shows demand profile of hybrid system through a week. Demand profile measurements started on Tuesday, 3 December, 00.00 am and completed on Monday, 9 December; 11.00 pm. Annual demand profile of hybrid system obtained by assuming weekly demand profile of system is same during the year.

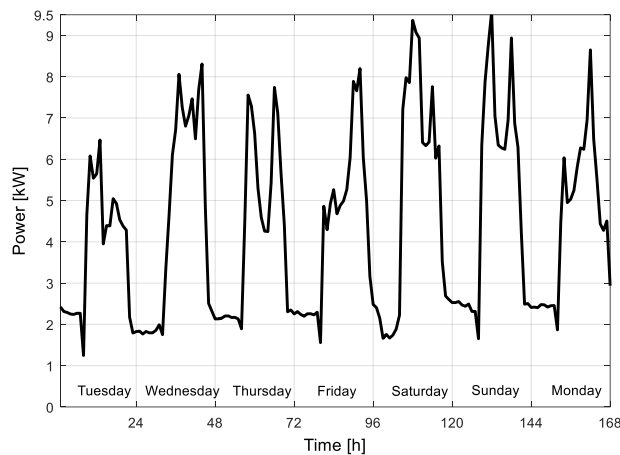


Figure 5. Demand profile of the hybrid system through week

It was assumed that each output of flow (P_i , $i = 1, 2, \dots, 8$) has a maximum power with a 15 kW. More information can be found about system structure and constraints in Zhou et al. (2015).

3. Results and Discussion

PV output is proportional with solar radiation. Annual total radiation on the surface of PV array with various tilt angle and orientation calculated using Eq. (4) and results shown in Figure 6. According to Figure 6, the annual solar radiation at different tilt angle and orientation varied between 677 kWh/m² to 1420 kWh/m². It was concluded that the peak total solar radiation more than 1420 kWh/m² can be achieved with tilt angles between 21° - 31° and orientation from -10° to 12°. Total solar radiation increases gradually until tilt angle and orientation reach the value of 26° tilt angle and 2° orientation, respectively. Total annual solar radiation value decreased gradually as tilt angle and orientation exceed value of 26° and 2°, respectively. Maximum total solar radiation on PV panel obtained when rotating PV array with an orientation 2° from south to west and tilts angle 26° from horizontal to vertical direction. Maximum annual solar radiation at the optimum tilt angle and orientation measured as 1423578.81 Wh/m².

Figure 7 shows output power of PV array (Wh/m²/year) under different tilt angle and orientation considering radiation and temperature. Annually generated PV outputs at different tilt angle and orientation have a minimum value of 74 kWh/m² and a maximum value of 150 kWh/m². Moreover, it is concluded that optimum tilt angle (26°) and orientation (2°) of radiation and temperature based PV model is the same as with the radiation based tilt angle and orientation. Similar to annual total radiation, maximum annual PV output power of radiation and temperature based PV model at the optimum tilt angle and orientation measured as 150912.83 Wh/m².

Effect of wind speed on total power (Wh/m^2) also studied and result compared with radiation and temperature based PV output power. Figure 8 shows total power considering radiation, temperature and wind speed. As seen in Figure 8, the total energy values higher compared to Figure 7 because wind speed effect on PV cell temperature did not ignored. Wind speed is inversely proportional with cell temperature and therefore, it increases PV efficiency. Total PV production using radiation, temperature and wind speed data result in changes of optimum orientation and tilt angle. It concluded that maximum annual PV production measured as 155152.84 Wh/m^2 using optimum tilt (27° horizontal to vertical) and orientation (2° from south to west).

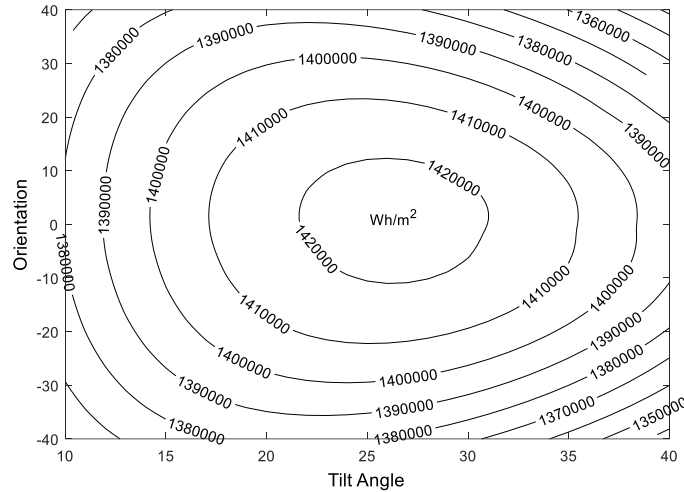


Figure 6. Annual solar radiation on surfaces of PV array under various tilt angle and orientation

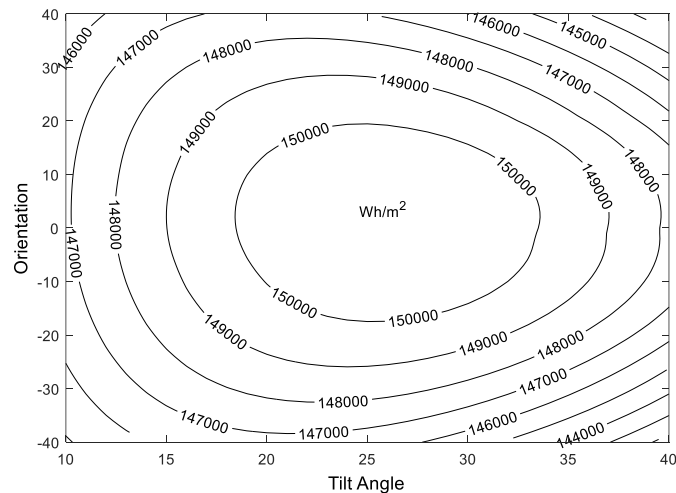


Figure 7. Annual power of PV based on radiation and temperature

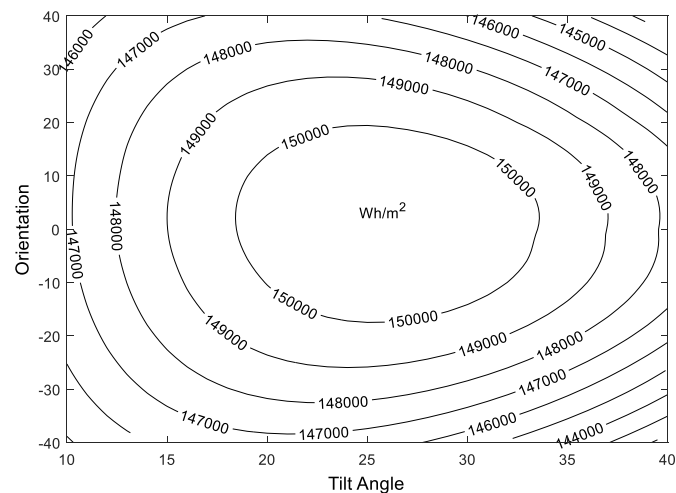


Figure 8. Annual PV output power based on radiation, temperature and wind speed

Economic value based optimization of tilt angle and orientation also investigated based on economic value of produced electricity using linear optimization method. This method performed to find optimum value of tilt angle and orientation by considering economic value approach. The value of tilt angle changed between 0° - 90° and orientation varied from -90° to 90°. These values increased in step of 15° and used for linear optimization method as input parameters. Choosing step of tilt angle and orientation as 15° enabled to use optimization area more effectively. Output of linear optimization method showed that 15° tilt and 30° orientation were suitable values for optimization of economic value of produced electricity. Optimization with an interval of results show that the economic value based optimum tilt angle and orientation are around the 15° and 30°, respectively. Linear optimization method performed second times using in step of 1° for tilt angle and orientation to obtain more results that are accurate. In this case, tilt angle started from 0° until 30° and minimum and maximum value of orientation were 15° and 45°, respectively. Optimization result of economic value variations depending on the different tilt angle and orientation shown in Figure 9. It was proved that that the annual electricity cost as a function of tilt angle and orientation were varied from less than 1650 \$ - 1710 \$. Optimum economic value achieved when orientation selected as 34° from south to west and tilts angle 9° from horizontal to vertical direction. Minimum electricity cost was calculated as 1633.40228 \$ by considering optimum value of tilt angle and orientation.

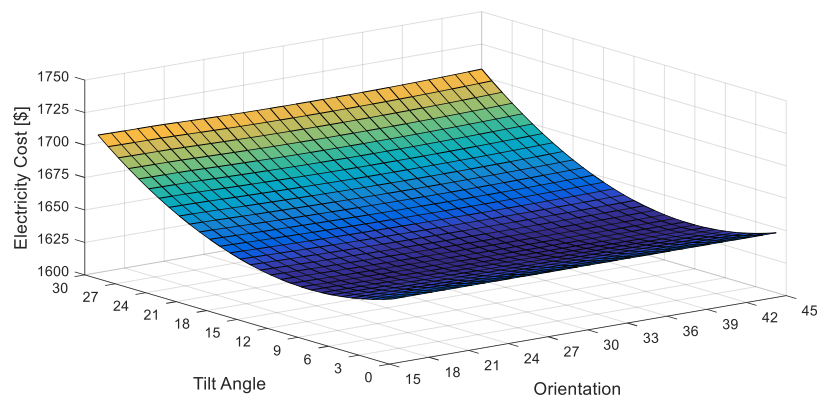


Figure 9. Cost of electricity as a function of orientation and tilt angle

Cost of electricity for a week was also calculated as 110.67684 \$ to show advantages of hybrid system. Cost of electricity using hybrid system with optimum parameters (orientation and tilt angle), was founded 31.4116 \$. This can be translated as 79.2652 \$ cost reduction of electricity compared to system without hybrid system. Hybrid system consisting wind turbine, PV array and battery with shorter payback time of period is possible using optimum tilt angle and orientation of economic value model.

Four different scenario considered and studied in this study. These modelling results confirmed that orientation changed from south to west to optimized PV panel efficiency. Moreover, optimum tilt angle founded on 26° - 27° for combination of wind-PV-battery system modelling and 9° for economic value modelling. Optimization results of economic value modelling might modified depending on demand profile and market price of electricity. Modelling results of economic value based optimization completed using Figure. 5 and Eq. (15). Output results of radiation and PV production obtained for per square meter, therefore, so there are no relation between these results and demand/electricity price.

Modelling results of different scenario under various parameters summarized in Table 2. As shown in Table 2, our results are completely different compared to reference values of tilt angle (41°) and orientation (south = 0°). In other word, our result showed that hybrid PV system is superior over previously announced systems in literature. System that is more effective is possible using proposed model of this study with a value of 2.321%.

Table 2. Optimum positioning results for different scenario

SCENARIO	OPTIMUM POSITION	UNIT	OPTIMUM VALUE	REFERENCE (41°/0°)	DEVIATION (%)
Radiation	26°/2°	kWh/m ² /year	1423.57881	1388.75595	2.507
Rad./Temp.	26°/2°	kWh/m ² /year	150.91283	150.91283	2.417
Rad./Temp./Wind	27°/2°	kWh/m ² /year	155.15284	155.63362	2.321
Economic Value	9°/34°	\$/year	1633.40228	1817.30789	-10.119

5. Conclusion (Result and Discussion)

In this paper, we have discussed various aspect of hybrid PV system with different position (orientation and tilt angle). Annual solar radiation, energy generation and economic value of generated energy were calculated using developed model in this study for a one year in Istanbul, Turkey. Input of model are environmental and economic conditions. Optimization results of PV array under different positioning provides to scientists' reference information to build more efficient hybrid PV systems. Four different scheme of PV systems considered to calculation and determination of optimum tilt angle and orientation. These are (1) total solar radiation, (2) PV production based on solar radiation and temperature, (3) PV production based on solar radiation, temperature and wind and (4) economic value and cost of electricity. The purpose of four different scheme was to find influence of electricity markets, demand, wind speed and temperature on optimum PV positioning. Our results indicated that the optimum tilt angle of a wind-PV-battery hybrid system become different when system is connected to the grid compared to tilt angle of maximum PV power and maximum solar radiation scheme. Economic value model studied due to show sustainability of energy, however, for other three models considered to obtain maximum energy and radiation. It expected that results of this study might be a reference and preliminary study for scientist and researcher/engineers to simplify designing and evaluating PV system. Moreover, more effective designing and building of roof with optimum orientation and tilt angle can provide to obtain maximum energy from PV system and thus, reduction of cost of electricity. Optimum tilt angles was founded on 26° - 27° for combination of wind-PV-battery system modelling and 9° for economic value modelling. As for orientation, it changed from south to west to increase output of PV system. It seems that hybrid system efficiency is very low due to deviation between our result and a reference study (2.321% - 10.119%), this gives a significant results and feasible investment as considering life time of PV system more than 20 years. As a future study, this study can be generalize to the national level with lots of local data.

Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

References

- Akdemir H., Durusu A., Erduman A., Nakir I., 2018. Effect of energy management of a grid connected PV/battery/load system on the optimal PV placement on a national scale: the case of Turkey, *J. Sol. Energ.-T. Asme*, 140(2), 1-8.
- Arikan O., Isen E., Durusu A., Kekezoglu B., Bozkurt A., Erduman A., 2013. Introduction to hybrid systems-Yildiz Technical University, IEEE Eurocon 2013 Conference, 2013, Zagreb-Croatia, 1145-1149, 1-4 July.
- Asl-Soleimani E., Farhangi S., Zabihi M.S., 2001. The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran, *Renew. Energy*, 24, 459-468.
- Ayaz R., Durusu A., Akca H., 2017. Determination of optimum tilt angle for different photovoltaic technologies considering ambient conditions: a case study for Burdur, Turkey, *J. Sol. Energ.-T. Asme*, 139(4), 1-6.
- Bakirci K., 2009. Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review, *Renew. Sust. Energy Rev.*, 13, 2580-2588.
- Beckman W. and Duffie J., 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, New York.
- Benghamen M., 2011. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia, *App. Energy*, 88, 1427-1433.
- Bringer S., Schilke S., Lohse I., Seckmeyer G., 2011. Case study showing that the tilt angle of photovoltaic plants is nearly irrelevant, *Sol. Energy*, 85, 470-476.
- Chow T.T., 2003. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, *Sol. Energy*, 75, 143-152.
- Durusu A., Erduman A., 2018. An improved methodology to design large-scale photovoltaic power plant, *J. Sol. Energ.-T. Asme*, 140(1), 1-11.
- Electricity price variation including all taxes. 2018. <http://gazelektrik.com/enerji-piyasalari/elektrik-fiyatlari#uc-zamanli>. 15 September 2018.
- El-Kassaby M.M., 1988. Monthly and daily optimum tilt angle for south facing solar collectors; theoretical model, experimental and empirical correlations, *Sol. Wind Tech.*, 5, 589-596.
- Elsayed M.M., 1989. Optimum orientation of absorber plates, *Sol. Energy*, 42, 89-102.
- Hiraoka S., Fujii T., Takakura H., Hamakawa Y., 2003. Tilt angle dependence of output power in an 80 kWp hybrid PV system installed at Shiga in Japan, *Sol. Energy Mat. Sol. C.*, 75, 781-786.
- John K., Kosmas K., Dimitrios Z., 2012. Experimental validation of the optimum photovoltaic panels' tilt angle for remote consumers, *Renew. Energy*, 46, 179-191.
- Kacira M., Simsek M., Yunus Y., Demirkol S., 2004. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey, *Renew. Energy*, 29(8), 1265-1275.
- Kaldellis J., Zafirakis D., 2012. Experimental investigation of the optimum tilt photovoltaic panels' tilt angle during the summer period, *Energy*, 38, 305-314.
- Kekezoglu B., Arikan O., Erduman A., Isen E., Durusu A., Bozkurt A., 2013. Reliability analysis of hybrid energy systems: Case study of Davutpasa Campus, IEEE Eurocon 2013 Conference, 2013, Zagreb-Croatia, 1141-1144, 1-4 July.
- Lewis G., 1987. Optimum tilt of solar collector, *Sol. Wind Tech.*, 4, 407-410.

- Liu B.H.Y., Jordan R.C., 1963. The longterm average performance of flat plate solar collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada, *Sol. Energy*, 7(2), 53-74.
- Ministry of Energy and Natural Resources of Turkey, 2019. <http://www.enerji.gov.tr/en-US/Mainpage>. 15 September 2019.
- Nakamura H., Yamada T., Sugiura T., Sakuta K., Kurokawa K., 2011. Data analysis on solar irradiance and performance characteristics of solar modules with a test facility of various tilted angles and directions, *Sol. Energy Mat. Sol. C.*, 67, 591-600.
- Rhodes J.D., Upshaw C.R., Cole W.J., Holcomb C.L., Webber M.E., 2014. A multi-objective assessment of the effect of solar PV array orientation and tilt on energy production and system economics, *Sol. Energy*, 108, 28-40.
- Tamizh M.G., Ji L., Tang Y., Petacci L., 2003. Photovoltaic module thermal/wind performance: Long-term monitoring and model development for energy rating, NCPV and Solar Program Review Meeting, Denver-USA, 1-4, 24-26 March.
- Wada H., Yamamoto F., Ueta K., Yamaguchi T., 2011. Generation characteristic of 100 kW PV system with various tilt angle and direction arrays, *Sol. Energy Mat. Sol. C.*, 95, 382-385.
- Yadav A.K., Chandel S.S., 2013. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review, *Renew. Sust. Energy Rev.*, 23, 503-513.
- Zhou W., Henerica T., Xiaohua X., 2015. Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system, *App. Energy*, 148, 294-304.



ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ BELİRLENMESİNDE SARGI DONATISININ VE EKSENEL YÜKÜN ETKİSİ

Saeid FOROUGHİ*, Rohullah JAMAL, S. Bahadır YÜKSEL

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

Anahtar Kelimeler

*Moment-Eğrilik İlişkisi,
Performans Düzeyi,
Hasar Sınırları,
Şekil Değişirme Sınırları,
Plastik Dönme.*

Öz

Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Farklı parametrelerde kare enkesitli betonarme kolon modelleri tasarlanmıştır. Gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden kolon kesitleri için eğrilik sünekliği ve akma dönmesi değerleri elde edilmiştir. Analitik olarak araştırılan parametreler TBDY 2018 hükümlerinden ve kesitlerin moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanmıştır. Daha sonra betonarme kolonların deprem performanslarının belirlenmesi için TBDY 2018'de verilen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak hesaplanmıştır. TBDY 2018'de tanımlanmış olan Göçmenin Önlenmesi, Kontrollü Hasar ve Sınırlı Hasar performans düzeyi hasar seviyeleri için betonarme kolonların şekil değiştirme sınırları ile plastik dönme değerleri elde edilmiştir. Betonarme kolonlar için farklı hasar sınırlarına göre şekil değiştirme taleplerine karşılık gelen hasar sınırları gözlenmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Betonarme kolonların farklı performans düzeyleri için oluşan şekil değiştirme değerleri, farklı sargı donatı oranına göre hesaplanan beton toplam birim şekil değiştirmeleri ve farklı eksenel yük seviyelerinde akma dönme değerleri ve plastik dönme değerleri hesaplanarak kolonların performans düzeyleri araştırılmıştır. Analizlerden eksenel yük seviyesinin artmasıyla hasar sınırlarının azaldığı, aynı eksenel yük seviyelerinde sargı donatı miktarının daha da önem kazandığı ve yönetmeliğin öngördüğü hasar sınırlarının son derece etkili olduğu sonuçları elde edilmiştir.

EFFECT OF CONFINING REINFORCEMENT AND AXIAL LOAD IN DETERMINING DEFORMATION BASED DAMAGE LIMITS

Keywords

*Moment-Curvature Relation,
Performance Level,
Damage Limits,
Deformation Limits,
Plastic Rotation.*

Abstract

In order to determine the earthquake performance of structural elements, the deformation-based damage limits for reinforced concrete elements in Turkish Building Earthquake Code (TBEC) 2018 were analyzed analytically. Reinforced concrete column models with square cross-section having different parameters were designed. From the moment-curvature relationships based on real material behaviors, curvature ductility and yield rotation values were obtained for column sections. Analytically investigated parameters were calculated from TBEC 2018 provisions and moment-curvature relationships. Afterward, deformation based damage limits given in TBEC 2018 were analyzed analytically in order to determine the earthquake performance of reinforced concrete columns. For the collapse prevention, controlled damage and limited damage performance levels defined in TBEC 2018, deformation limits and plastic rotation values of reinforced concrete columns were obtained. For the reinforced concrete columns, the damage limits corresponding to the deformation demands according to different damage limits were observed and the damage limits were evaluated. The performance values of the columns were investigated by calculating the deformation limits for different

* İlgili yazar / Corresponding author: saeid.foroughi@yahoo.com, +90-553-176 5223.

performance levels of reinforced concrete columns, total unit deformations of concrete calculated according to different confining reinforcement ratios, and yield rotation and plastic rotation values at different axial load levels. From the analysis, it was obtained that the damage limits decreased with the increase of the axial load level, the amount of confining reinforcement became more important at the same axial load levels and the damage limits envisaged by the regulation were extremely effective.

Alıntı / Cite

Foroughi, S., Jamal, R., Yüksel, S. B., (2020). Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Belirlenmesinde Sargı Donatısının ve Eksenel Yükün Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1042-1052.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Foroughi, 0000-0002-7556-2118
R. Jamal, 0000-0001-5987-8502
S. B. Yüksel, 0000-0002-4175-1156

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	13.06.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	04.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Betonarme kolonlar, çerçevesel yapıların sismik davranışını belirleyen ana taşıyıcı elemanlardır. Betonarme yapılarda depremler sonrası kolonlarda oluşan hasarlar nedeniyle yapıların objektif performans seviyeleri sağlanamamaktadır. Bu nedenle, depreme dayanıklı yapı tasarım için yapısal elemanların davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri, malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaktadır. Doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle hesaplanan şekil değiştirmelerin, kesit hasar sınırlarına karşı gelmek üzere tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir (Foroughi ve Yüksel, 2019). Şiddetli depremlere maruz kalan betonarme binaların doğrusal olmayan davranışı ve hasar özelliklerinin anlaşılması, mevcut binaların sismik performansının yanı sıra yeni binaların güvenli ve ekonomik tasarımının değerlendirilmesi için esastır (Uçar ve Merter, 2015).

Sismik etkiler altında betonarme yapılardaki kolon hasarlarının ve göçmelerinin nedeni kesme kırılması, eğilme kırılması, eğilme ve kesme kırılmasıdır. Betonarme yapılarda tasarlanan kolonlar yeterli kesme dayanımı ve yeterli şekil değiştirme kapasitede bir davranışa sahip olmalıdır. Performans esaslı deprem yönetmelikleri kolonların eğilme performansını plastik mafsallı bölgelerinin toplam dönme kapasitesi veya plastik dönme kapasitesi ile ifade etmektedir. Plastik mafsallı bölgelerinde kesme veya eğilme-kesme kırılması kesinlikle önlenmektedir (Acun ve Sucuoğlu, 2011).

Türkiye’de meydana gelen büyük depremler neticesinde kentsel bölgelerdeki mevcut binaların deprem riskine karşı oldukça dayanıksız olduğu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla, mevcut betonarme binaların deprem güvenliğinin önceden belirlenmesi ve depreme karşı dayanıksız yapıların güçlendirilmesi hayati önem taşımaktadır (Dilmaç vd., 2018). Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır (Sinani, 2014).

Performansa dayalı tasarım temelde üç parametreden oluşmaktadır. Bunlar kapasite, talep ve performanstır (Celep ve Kumbasar, 2004). Talep, sismik hareketlerin yapıdan karşılama istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir (Çavdar vd., 2015). Performansa dayalı tasarım en genel haliyle, bir yapının tasarım depremi etkisinde belirli bir yapısal performans, bir başka deyişle hasar öngörülerek şekil değiştirmeye dayalı tasarım yöntemleri de kullanılarak tasarlanmasıdır. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri; malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaktadır. (Aydemir vd., 2011). Performans esaslı yaklaşımların en önemli aşamalarından birisi yapısal elemanlardaki hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Bu nedenle hasarla doğrudan ilişkili olan şekil değiştirmeleri esas alan yöntemler, kuvvet esaslı olanlara göre çok daha güvenilir yönde sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, hasarı belirlemek için esas alınan şekil değiştirme parametresi de büyük önem arz etmektedir (Hasgöl vd., 2016).

Birçok deprem yönetmeliğinde, mevcut binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesi amacıyla bazı yöntemler önerilmiştir. Binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesi için önerilen yöntemlerin önemli bir kısmını oluşturan sınır değerleri birçok parametreye göre belirlenmektedir (Ulutaş vd., 2015). Mevcut veya yeni yapılacak betonarme bir yapının deprem güvenliğinin belirlenmesi için öncelikle her bir taşıyıcı elemanın kesit hasar seviyesinin belirlenmesi gereklidir. Bunun için doğrusal olmayan değerlendirme yöntem ile deprem güvenliği

belirlenecek yapı analiz edilir. Yapılan analiz sonucu kesitte oluşan şekil değiştirme değerinin, deprem yönetmelikteki kesit hasar seviyesine karşı gelen şekil değiştirme üst sınır değerleri ile kıyaslayarak kesitin hasar seviyesi elde edilir (Ulutaş, 2019). Mevcut yapıların değerlendirme yöntemlerinde, yönetmelikler genel olarak yapı elemanlarının plastik dönme kapasiteleri üzerinden eleman performanslarını belirlemektedir (Elçi ve Göker, 2018).

Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de tanımlanan yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri (kesit hasar durumları) sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır (TBDY, 2018). Bu çalışmada kare enkesitli betonarme kolonların hasar sınırları, TBDY (2018)'de öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının dikkate alınmasıyla analitik olarak incelenmiştir. Kare enkesitli betonarme kolon modelleri tasarlanmıştır. İlk olarak gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen momenti-eğrilik ilişkilerinden kolon kesitlerinin elastik ötesi davranışları incelenerek değerlendirilmiştir. Betonarme kolonların farklı eksenel yük seviyeleri ve sargı donatı oranları için moment-eğrilik ilişkileri Mander beton modeli (Mander vd., 1988) dikkate alınarak elde edilmiştir. Parametrelerin kolon davranışı üzerindeki incelenen etkileri kesitin mukavemeti ve süneklik açısından değerlendirilmiştir. Tasarlanan betonarme kolon kesitlerde, farklı parametrelerin moment-eğrilik ilişkisi ve süneklik üzerindeki etkisi hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Daha sonra betonarme kolonlar için şekil değiştirme değerleri TBDY (2018)'de tanımlanmış olan GÖ, KH ve SH performans seviyeleri için hesaplanmıştır. Yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kolon hasarları elde edilmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Farklı performans düzeyleri için kolonların plastik mafsal bölgeleri için akma dönme değerleri ve plastik dönme değerleri hesaplanmıştır.

2. TBDY (2018)'e göre Betonarme Kesitlerin Hasar Sınırlarının Belirlemesi (Determination of Damage Limits of Reinforced Concrete Sections According to TBDY, 2018)

TBDY (2018)'de sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. SH ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, KH kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, GÖ hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. GÖ, KH ve SH durumları için yayılı plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri için izin verilen sınırlar Tablo 1'de tanımlanmıştır. GÖ, KH ve SH durumları için yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan plastik dönmeler için izin verilen sınır, kesite etkiyen eksenel kuvvet, beton ve donatı çeliği modelleri dikkate alınarak yapılacak eğrilik analizi sonucunda Tablo 2'de verilen denklemler ile hesaplanmıştır.

Tablo 1. Farklı performans düzeylerine göre toplam birim şekil değiştirmeler (Total unit Deformations according to different performance levels) (TBDY, 2018)

Şekil Değiştirme Sınırları	Beton Birim Kısalması	Donatı Çeliği Birim Şekil Değiştirmesi
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018$	$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.40\varepsilon_{su}$
Kontrollü Hasar (KH)	$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75\varepsilon_c^{(GÖ)}$	$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(GÖ)}$
Sınırlı Hasar (SH)	$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$	$\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$

Tablo 2. Farklı performans düzeylerine göre plastik dönmeler (Plastic rotations for different performance levels) (TBDY, 2018)

Şekil Değiştirme Sınırları	Plastik Dönmeler
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\varphi_u - \varphi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \varphi_u d_b \right]$
Kontrollü Hasar (KH)	$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)}$
Sınırlı Hasar (SH)	$\theta_p^{(SH)} = 0$
φ_u , Göçme öncesi eğrilik, φ_y , Akma eğriliği, L_s , Kesme açıklığı, L_p , Plastik mafsal boyu,..... d_b , Boyuna donatı çapı	

Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı Denklem (1)'den hesaplanmaktadır. Dikdörtgen sargı donatısının etkinlik katsayısı (α_{se}) ve kesitte iki yatay doğrultuda minimum hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Denklem (2) ile

hesaplanmaktadır. f_{ywe} ve f_{ce} beton ve donatı çeliği için beklenen dayanımdır ($f_{ce}=1.3f_{ck}$, $f_{ye}=1.2f_{yk}$). A_{sh} ; enine donatının alanı, s enine donatı aralığını, b_o ve h_o ; sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutu ve a_i ; bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığıdır (TBDY, 2018).

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh, \min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (1)$$

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum \alpha_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right), \quad \rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (2)$$

Hasar kontrolü basınç birim şekildeğiştirme sınırı (Priestley vd., 2007) betonun basınç altındaki şekildeğiştirme kapasitesinin kesiti sargılayan enine donatının kopma dayanımına bağlı olduğu varsayımına dayanarak beton ve sargı donatısının şekildeğiştirme enerjilerini kullanarak Denklem (3) ile elde etmişlerdir.

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (3)$$

Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsall oluşumuna izin verilmeyecektir. Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsall akma dönmesi (θ_y) Denklem (4) ile hesaplanmıştır. Kolonlarda $\eta = 1$ alınacaktır. Denklem (4)'te; φ_u göçme öncesi eğrilik, φ_y akma eğriliği, L_s kesme açıklığı, L_p , plastik mafsall boyu, d_b boyuna donatı çapı, f_{ywe} ve f_{ce} beton ve donatı çeliği için beklenen dayanımdır (TBDY, 2018).

$$\theta_y = \frac{\varphi_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\varphi_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (4)$$

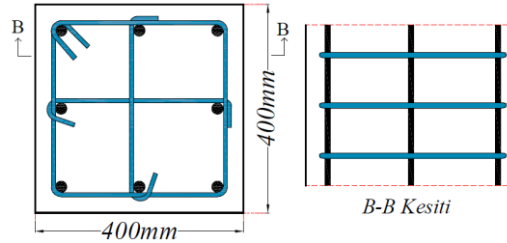
Çalışma kapsamında tasarlanan betonarme kolon modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde; GÖ, KH ve SH için oluşan şekil değıştirme sınır değerleri, farklı sargı donatı oranına göre hesaplanan beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri, farklı eksenel yük seviyelerinde plastik mafsall akma dönmesi ve plastik dönmele hesaplanarak kolon kesitlerinin performans düzeyleri araştırılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada betonarme yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için TBDY (2018)'de verilen kurallara göre farklı parametrelere sahip betonarme kolon modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan betonarme kolon modellerinin kesit görünüşü ve donatı yerleşim planı Şekil 1'de ve kolon modellerine ait kesit özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Tasarlanan betonarme kolon kesitlerinde gerçek malzeme davranışları esas alınarak farklı parametrelere göre (sargı donatı oranı ve eksenel yük seviyesi) analizlerden elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden akma eğriliği (φ_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğrilik (φ_u), eğilme momenti kapasitesi (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kolon modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanarak kolon kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Betonarme kolonların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak farklı parametrele için moment-eğrilik ilişkileri SAP2000 (v.20.2.0) programı ile elde edilmiştir. Moment-eğrilik analizlerinde, kabuk betonu için Mander sargısız beton modeli, çekirdek betonu için Mander sargılı beton modeli (Mander vd., 1988) ve donatı çeliği için Şekil 2 ve Tablo 4'te verilen pekleşmeli model kullanılmıştır. Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak süneklik, eğrilik süneklik katsayısı (μ) ile ifade edilir. Eğrilik süneklik katsayısı (μ), moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen göçme öncesi eğriliğin (φ_u) akma eğriliğine (φ_y) oranı olarak hesaplanır ($\mu = \varphi_u / \varphi_y$).

Yönetmelikte (TBDY, 2018) verilen hasar sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme değerleri kare enkesitli betonarme kolon modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme sınırlarının hesaplanmasında TBDY (2018)'de tanımlanmış üç farklı hasar sınırı olan GÖ, KH ve SH seviyeleri kullanılmıştır. Birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, farklı kesit hasar sınırlarına (GÖ, KH ve SH performans düzeyleri) göre izin verilen beton ve donatı çeliği Şekil değiştirme üst sınırları (kapasiteleri) hesaplanmıştır. Beton ve donatı çeliği şekil değiştirme değerleri Tablo 1'de verilen denklemlerden hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen betonarme kolonların moment-eğrilik

ilişkilerinden elde edilen φ_y ve φ_u değerlerine göre plastik mafsal dönme değerleri hesaplanmıştır. Plastik mafsal dönmeleri Tablo 2'de verilen denklemlere göre hesaplanmıştır. Betonarme kolon kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen kesitteki boyuna donatı oranının, TS500 (2000)'e göre %1 ile %4 arasında olmasını sağlamaktır. Betonarme kolonlarda sünek davranışın sağlanabilmesi için bu koşul yönetmeliklerce zorunlu olduğu için bu çalışmada TS500 (2000)'de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. Her betonarme kolon modeli için beş farklı eksenel yük seviyesi ($N_1=0$, $N_1=480\text{kN}$, $N_2=960\text{kN}$, $N_3=1440\text{kN}$, $N_4=1920\text{kN}$), beş farklı sargı donatı aralığı (50mm, 75mm, 100mm, 125mm ve 150mm) kullanılmıştır. Boyuna donatı çapı (8 Φ 22) ve sargı donatı çapı (Φ 8mm) sabit olarak dikkate alınmaktadır. Tüm betonarme kolon modeller için, beton sınıfı olarak C30 ve donatı çeliği olarak B420C seçilmiştir. Yapılan analitik çalışmada TBDY (2018)'de beton ve donatı için verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır (Tablo 4). Bileşik eğilme altındaki bir kesitin moment-eğrilik ilişkileri, eksenel yük seviyelerine bağlıdır. Düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü olmak üzere, $A_c \geq N_{dmax}/0.40f_{ck}$ koşulu sağlanmalıdır (TBDY, 2018). Betonarme kolon kesitlerinde, $N_{max} = A_c \times f_{ck}$ olmak üzere N/N_{max} oranının 0.0, 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri için moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir.



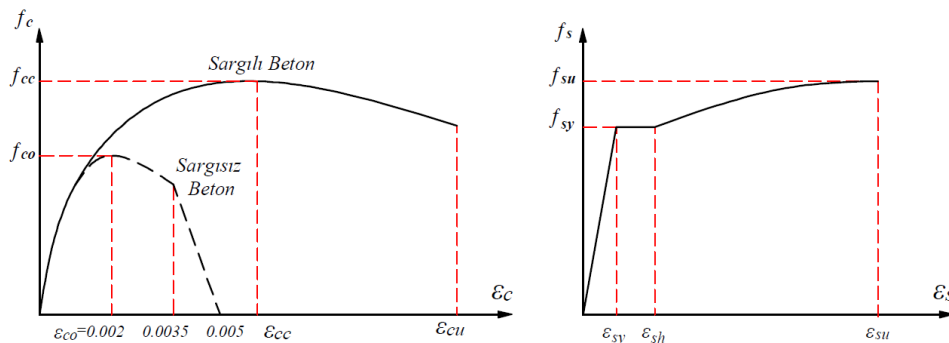
Şekil 1. Tasarlanan kolon modellerinin enkesit boyutları ve donatı yerleşim planı (Cross-section dimensions of the designed column models and reinforcement layout plan)

Tablo 3. Tasarlanan kolon modellerine ait parametreler (Parameters for the designed column models)

Kesit Tip	Beton Sınıfı	Boyuna donatı	Eksenel yük	Sargı donatısı
Tip-1	C30	8 Φ 22mm	0.0	Φ 8/50mm
Tip-2			0.1 N_d	Φ 8/75mm
Tip-3			0.2 N_d	Φ 8/100mm
Tip-4			0.3 N_d	Φ 8/125mm
Tip-5			0.4 N_d	Φ 8/150mm

Tablo 4. Beton ve donatı çeliği için malzeme parametreleri (Material parameters for concrete and reinforcement) (TBDY, 2018)

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C30	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değıştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil değıştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	30MPa
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin akma birim şekil değıştirmesi (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değıştirmesi (ϵ_{sh})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değıştirmesi (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

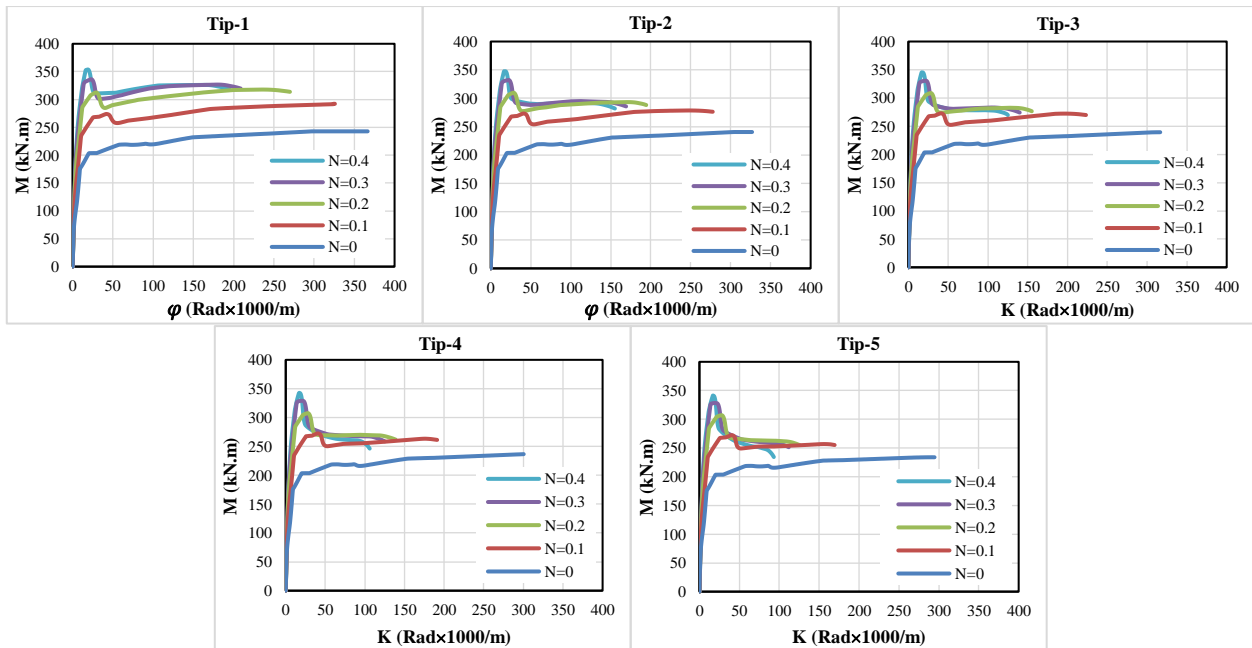


Şekil 2. Beton ve donatı çeliği için gerilme-şekil değıştirme ilişkileri (Stress-strain relationships for concrete and reinforcement) (TBDY, 2018)

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

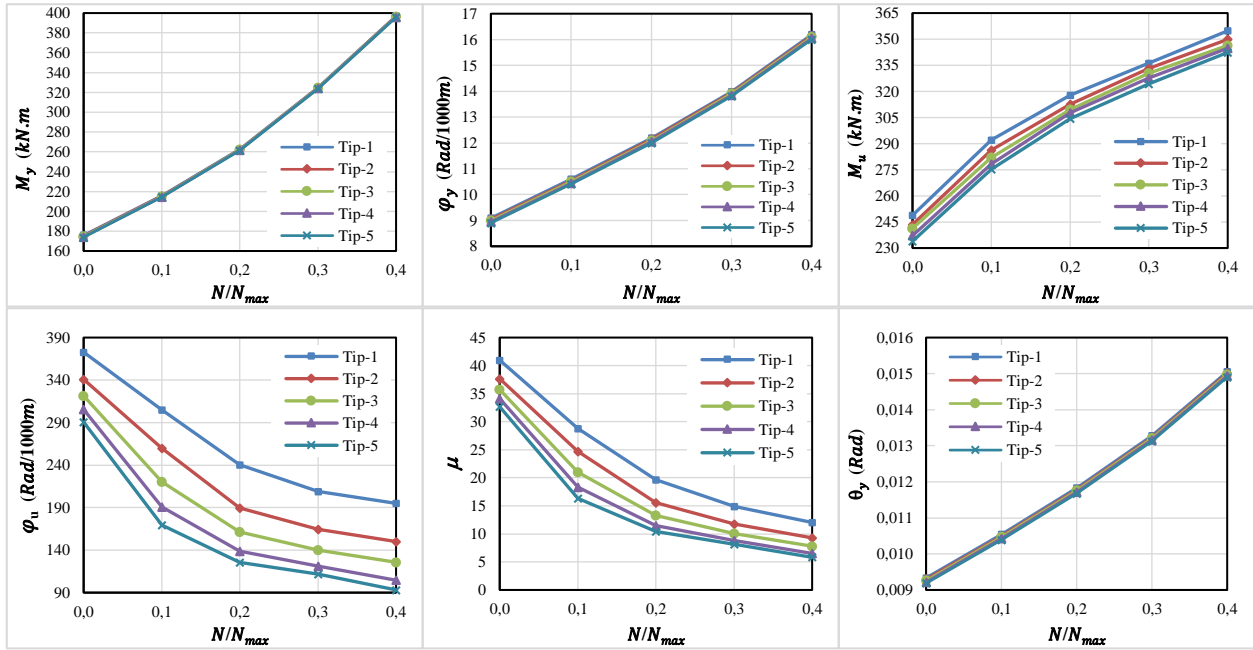
Analizleri yapılan betonarme kare enkesitli kolonların moment-eğrilik ilişkileri sargı donatısının oranı ve eksenel yük seviyesi değiştirilerek elde edilmiştir. Kare enkesitli betonarme kolonlar için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3'te verilmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri malzemelerin doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak farklı parametreler için SAP2000 programı ile elde edilmiştir. Kolon modelleri için farklı parametrelere göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kolon modelleri için φ_y , M_y , φ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kolon modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak kolon kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Yığılı plastik davranışına göre modellenen kare enkesitli betonarme kolonların farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri Denklem (4) ile hesaplanmıştır. Kare enkesitli betonarme kolon modelleri için elde edilen φ_y , M_y , φ_u , M_u , μ ve θ_y farklı eksenel yük seviyelerine göre ilişkileri sırasıyla Şekil 4'te özetlenmiştir. Betonarme kolon modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde; GÖ, KH ve SH için oluşan şekil değiştirme sınır değerleri, farklı sargı donatı oranına göre beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ve farklı eksenel yük seviyelerinde plastik mafsallık dönme değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kolonların farklı performans düzeyleri için farklı parametrelere göre $N/N_{max} - \varepsilon_c$, $N/N_{max} - \varepsilon_s$ ve $N/N_{max} - \theta_p$ ilişkileri Şekil 5'te verilmiştir. Tasarlanan betonarme kolonlar için elde edilen $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerlerinin N/N_{max} oranına göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

Betonarme kolon kesitlerinde farklı parametreler için farklı performans düzeylerine göre hesaplanan $\varepsilon_s^{(GÖ)}$, $\varepsilon_s^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)}$ değerleri sabittir. Bunun nedeni yönetmelikte (TBDY, 2018) donatı çeliği için verilen hasar sınırları; donatı çeliğinin kopma dayanımının farklı hasar seviyeleri için sabit katsayılar ile çarpılarak bulunmasıdır. Farklı performans düzeyi için $\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.032$, $\varepsilon_s^{(KH)} = 0.024$ ve $\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$ olarak sabit değerler hesaplanmaktadır. Sargılı beton için verilen hasar sınırları ($\varepsilon_c^{(GÖ)}$, $\varepsilon_c^{(KH)}$), donatı çeliği ve betonun ortalama dayanımı (f_{ye} , f_{ce}), $\rho_{sh,min}$ ve sargı donatısının konfigürasyonuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Sargılı betonun SH performans düzeyi için hasar sınırı ise sabit değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$). Farklı performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları (θ_p); φ_y , φ_u , L_p , L_s ve d_p 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla eksenel yük seviyesi, sargı donatı oranı, boyuna donatı oranı, kesit geometrisi ve sargı donatısının konfigürasyonu gibi φ_y ve φ_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p değerlerini de etkilemektedir. SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsallık oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kolon kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan kolon modellerine ait karşılaştırmalı moment-eğrilik ilişkileri (Comparative moment-curvature relationships of designed column models.)

Analiz sonuçları incelendiğinde, eksenel yük ve sargı donatısının varyasyonunun, betonarme kesitlerin moment-eğrilik davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, sargı donatı aralığı ve eksenel yük seviyesinin artışı her bir betonarme kolon için elemanların akma ve kırılma durumları için moment ve eğrilik değerlerini etkilemektedir.

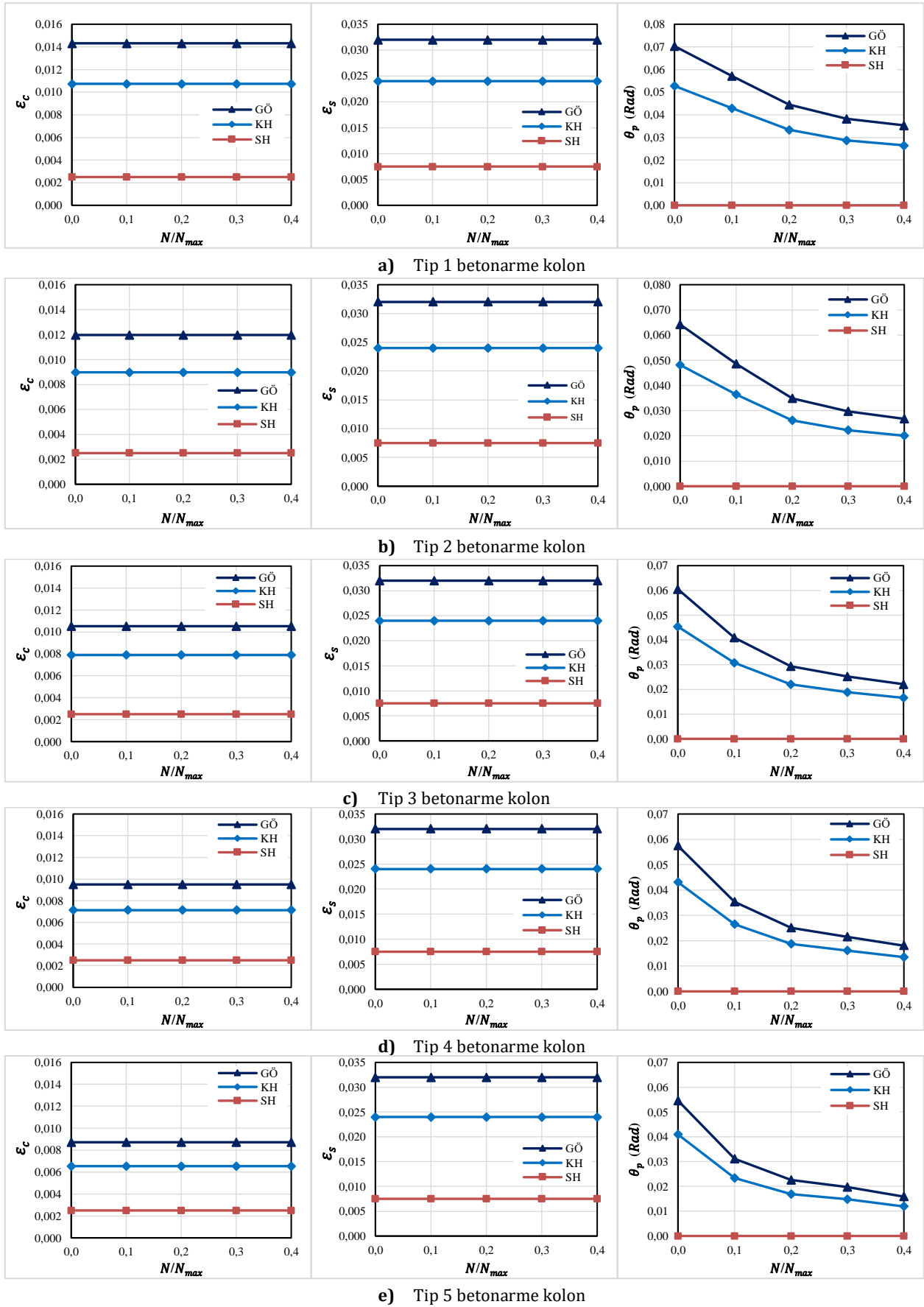


Şekil 4. Betonarme kolonların farklı parametrelere göre hesaplanan k_y , M_y , k_u , M_u , μ ve θ_y değerlerinin N/N_{max} oranına göre ilişkileri (Relationships of k_y , M_y , k_u , M_u , μ and θ_y calculated values according to N/N_{max} ratio of reinforced concrete columns)

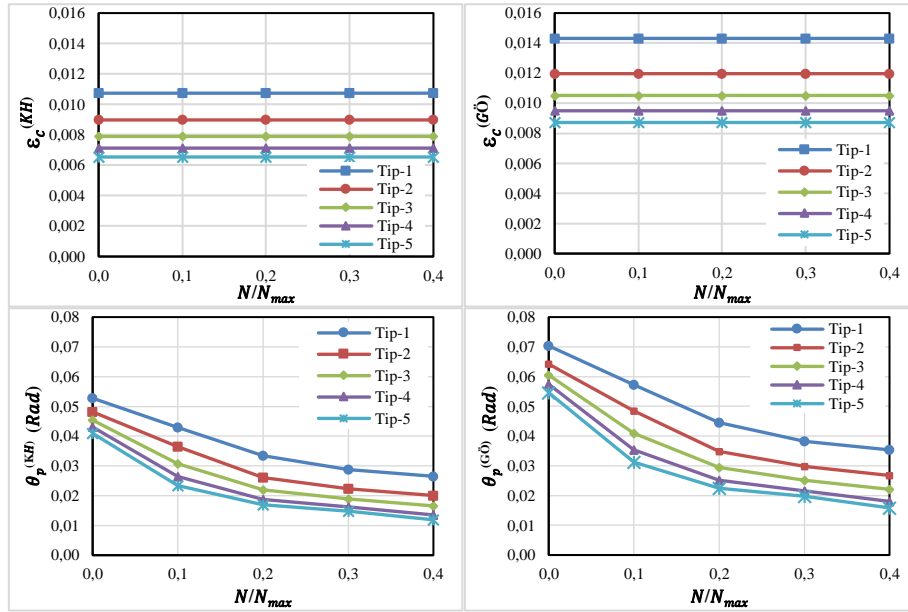
Betonarme kolonların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden; eksenel yük değerinin artışıyla birlikte betonarme kolon kesitlerinin M_y , ϕ_y ve M_u değerlerinde artış ve ϕ_u değerlerinde azalma görülmektedir. Sargı donatısı aralığının artmasıyla M_y ve ϕ_y değerleri sabit kalmakta, M_u ve ϕ_u değerleri azalmaktadır. Sabit eksenel yük seviyesi için sargı donatı aralığının azaltılması ile kesit sünekliğinin arttığı, moment taşıma kapasiteleri ve eğriliğin önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Sabit sargı donatısı oranı için eksenel yük ($N/N_{max} \geq 0$) oranının artmasıyla kolonların sünekliği azalmaktadır. Bununla birlikte, aynı sabit sargı donatısı oranları için eksenel yük seviyesi küçük olduğunda, kolonlarda yüksek süneklik değerleri elde edilmektedir. Sabit sargı donatı aralığı için eksenel yük seviyesinin artması ile TBDY (2018)'e göre hesaplanan plastik mafsallık dönmesi (θ_y) artmaktadır. Sabit eksenel yük seviyesi için artan sargı donatı aralığına göre hesaplanan θ_y değerleri az farkla azalmaktadır.

Sargılı beton için verilen hasar sınırları ($\epsilon_c^{(G\ddot{O})}$, $\epsilon_c^{(KH)}$), beton ve donatı çeliğinin ortalama dayanımı (f_{ce} , f_{ye}), $\rho_{sh,min}$ ve sargı donatısının konfigürasyonuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Sargılı betonun SH performans düzeyi için hasar sınırı ise sabit değer olarak verilmektedir ($\epsilon_c^{(SH)} = 0.0025$). Betonarme kolonlarda sargı donatı çapı ve aralığı için eksenel yük seviyesinin artması ile analizlerden elde edilen sonuçlara göre GÖ ve KH performans seviyelerinde beton ve donatı çeliğinin birim deformasyon değerleri sabit kalmaktadır. TBDY (2018)'de donatı çeliği için farklı performans düzeylerinde verilen hasar sınırları, donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerini sabit katsayılar ile çarparak elde edilmektedir. $\epsilon_c^{(G\ddot{O})}$ ve $\epsilon_c^{(KH)}$ hasar sınırları sargı donatı aralığına göre değişmektedir. Sargı donatı aralığının artması ile $\epsilon_c^{(G\ddot{O})}$ ve $\epsilon_c^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır.

Farklı performans düzeyi için verilen θ_p sınırları ϕ_y , ϕ_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla eksenel yük seviyesi ve sargı donatı oranı gibi ϕ_y ve ϕ_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p değerlerini de etkilemektedir. $\theta_p^{(G\ddot{O})}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ hasar sınırları, moment-eğrilik ilişkisi ve eksenel yük seviyelerine göre değişmektedir. Sabit eksenel yük seviyesi için sargı donatı aralığının artması ile $\theta_p^{(G\ddot{O})}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır. Sabit sargı donatı aralığı için eksenel yük seviyesinin artması ile $\theta_p^{(G\ddot{O})}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır.



Şekil 5. Betonarme kolonların farklı parametrelere göre karşılaştırmalı $\epsilon_c - N/N_{max}$, $\epsilon_s - N/N_{max}$, $\theta_p - N/N_{max}$ ilişkileri (Comparative relations of $\epsilon_c - N/N_{max}$, $\epsilon_s - N/N_{max}$, $\theta_p - N/N_{max}$ in reinforced concrete columns according to different parameters)



Şekil 6. Tasarlanan betonarme kolonlar için elde edilen $\varepsilon_c^{(KH)}$, $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, θ_p^{KH} ve $\theta_p^{GÖ}$ değerlerinin N/N_{max} oranına göre değişimi (Variation of $\varepsilon_c^{(KH)}$, $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, θ_p^{KH} and $\theta_p^{GÖ}$ values obtained for designed reinforced concrete columns according to N/N_{max} ratio).

Betonarme kolonların TBDY (2018)'e göre hesaplanan $\varepsilon_c^{(KH)}$, $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, θ_p^{KH} ve $\theta_p^{GÖ}$ değerleri farklı parametrelere göre değişimi oran olarak incelenerek karşılaştırılmıştır. KH için hesaplanan sınır değerleri (θ_p ve ε_c) GÖ için hesaplanan değerlerin sabit bir katsayı (0.75) ile çarpılarak elde edildiği için KH ve GÖ için oranlar sabit olarak değişmektedir. Bu yüzden Tablo 5, 6 ve 7'de farklı tasarım parametrelerine göre hesaplanan GÖ sınır değerleri için oran değişimlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Farklı tasarım parametrelerine göre hesaplanan performans düzeyi değerleri arasındaki farklar oran olarak Denklem (5, 6 ve 7) kullanılarak elde edilmiştir. Tip 1 analiz sonuçlarına göre Tip i (Tip 2 - Tip5) analiz sonuçlarının değişim oranı (%D) Denklem (5)'de olduğu gibi hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur.

$$D\% = \left[\frac{(\theta_p^{GÖ})_{Tip1} - (\theta_p^{GÖ})_{Tip i}}{(\theta_p^{GÖ})_{Tip1}} \right] \quad (5)$$

Tablo 5. Farklı tasarım parametreleri için hesaplanan performans seviyesi değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of calculated performance level values for different design parameters)

Kesit Tip	$N/N_{max} = 0$		$N/N_{max} = 0.1$		$N/N_{max} = 0.2$		$N/N_{max} = 0.3$		$N/N_{max} = 0.4$	
	$\theta_p^{GÖ}$	D (%)	$\theta_p^{GÖ}$	D (%)	$\theta_p^{GÖ}$	D (%)	$\theta_p^{GÖ}$	D (%)	$\theta_p^{GÖ}$	D (%)
Tip 1	0,0703	0,0	0,0572	0,0	0,0445	0,0	0,0383	0,0	0,0353	0,0
Tip 2	0,0642	8,7	0,0485	15,1	0,0348	21,8	0,0297	22,3	0,0267	24,3
Tip 3	0,0605	14,0	0,0409	28,4	0,0294	34,0	0,0252	34,3	0,0221	37,6
Tip 4	0,0574	18,3	0,0353	38,2	0,0251	43,6	0,0216	43,7	0,0180	49,0
Tip 5	0,0546	22,4	0,0312	45,5	0,0225	49,4	0,0197	48,5	0,0159	55,1

$N/N_{max} = 0$ analiz sonuçlarına göre $N/N_{max} = i$ (0.1 – 0.4) analiz sonuçlarının değişim oranı Denklem (6)'da olduğu gibi hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

$$D\% = \left[\frac{(\theta_p^{GÖ})_{N/N_{max}=0} - (\theta_p^{GÖ})_{N/N_{max}=i}}{(\theta_p^{GÖ})_{N/N_{max}=0}} \right] \quad (6)$$

Tablo 6. Farklı N/N_{max} oranı için hesaplanan performans seviyesi değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of calculated performance level values for different ratio of N/N_{max})

N/N_{max}	Tip 1		Tip 2		Tip 3		Tip 4		Tip 5	
	$\theta_p^{G\ddot{O}}$	D (%)	$\theta_p^{G\ddot{O}}$	D (%)	$\theta_p^{G\ddot{O}}$	D (%)	$\theta_p^{G\ddot{O}}$	D (%)	$\theta_p^{G\ddot{O}}$	D (%)
0	0,0703	0	0,0642	0	0,0605	0	0,0574	0	0,0546	0
0.1	0,0572	18,7	0,0485	24,4	0,0409	32,3	0,0353	38,5	0,0312	42,9
0.2	0,0445	36,7	0,0348	45,8	0,0294	51,4	0,0251	56,3	0,0225	58,7
0.3	0,0383	45,6	0,0297	53,7	0,0252	58,4	0,0216	62,5	0,0197	63,9
0.4	0,0353	49,7	0,0267	58,3	0,0221	63,5	0,0180	68,6	0,0159	71,0

GÖ performans seviyesi için hesaplanan beton birim kısalması, Tip1 analiz sonuçlarına göre Tipi analiz sonuçlarının değişim oranı Denklem (7)'den hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur.

$$D\% = \left[\frac{(\varepsilon_c^{G\ddot{O}})_{Tip1} - (\varepsilon_c^{G\ddot{O}})_{Tip i}}{(\varepsilon_c^{G\ddot{O}})_{Tip1}} \right] \quad (7)$$

Tablo 7. Farklı tasarım parametrelerine göre analiz sonuçlarından elde edilen beton birim şekil değiştirme değerleri (Concrete unit deformation valuse obtained from analysis results according to different design parameters)

Kesit Tip	$\varepsilon_c^{(G\ddot{O})}$	D (%)
Tip 1	0,0143	0,0
Tip 2	0,0120	16,4
Tip 3	0,0105	26,5
Tip 4	0,0095	33,6
Tip 5	0,0065	39,1

5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Araştırma Bulguları bölümünde betonarme kolonlar için elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

TBDY (2018)'de donatının maksimum uzama şekil değıştirme değerine (ε_{su}) bağlı olarak donatı çeliği şekil değıştirme üst sınırları değışmektedir. Eksenel yük seviyesindeki artışın hem eleman sünekliliğini hem de kesit hasar sınırlarını önemli derecede azaltmaktadır. Sargı donatı aralığı maksimum olduğunda ($\Phi 8/150\text{mm}$) tüm analizlerde TBDY (2018)'e göre hesaplanan eleman hasar sınırlamaları düşük mertebelerde kalmıştır. Sargı donatısının minimum ($\Phi 8/50\text{mm}$) ve maksimum ($\Phi 8/150\text{mm}$) olduğu kolon modellerinde TBDY (2018)'e göre elde edilen eleman hasar sınırları eksenel yük seviyesinden etkilenmektedir. Kolon modellerinde eksenel yük seviyesinin düşük olduğu durumlarda sargı donatısı aralığının minimum ve maksimum olması durumunda elde edilen eleman hasar sınırlamalarının önemli derecede etkilendiği görülmektedir. Eksenel yük seviyesinin artmasıyla, sargılamının etkisinin daha belirgin olarak ortaya çıktığı, sargı donatı aralığının artmasıyla eleman hasar sınırlamalarının önemli derecede azaldığı analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Eksenel yük seviyesi artmasıyla kesitin hasar sınırına karşı gelen eğrilik değeri azalmaktadır. Dolayısı ile eksenel yük seviyesi arttıkça kolon kesitlerinin hasar sınırları düşük şekil değıştirme değerinde oluşacağı söylenebilir. Sargı donatısı aralığı azaldıkça beklendiği gibi kesitin moment kapasitesi artmaktadır. Betonarme kolon modellerinde eksenel yük seviyesinin artmasıyla hasar sınır değerlerinin azaldığı, aynı eksenel yük seviyelerinde sargı donatı miktarının daha da önem kazandığı ve yönetmeliğin öngördüğü hasar sınırlarının son derece etkili olduğu sonuçları elde edilmektedir.

Farklı tasarım parametrelerine göre hesaplanan hasar sınır değerleri arasındaki farklar elde edilmiş ve oransal olarak sunulmuştur (Tablo 5, 6 ve 7). Hesaplanan hasar sınır değerleri arasındaki farklar tasarım parametrelerine göre incelenmiş ve aşağıdaki yorumlar elde edilmiştir. Tablo 5'de özetlenen analiz sonuçlarının incelenmesinden; betonarme kolonlarda sargı donatı aralığının artması ile (Tip 1- Tip 5) $N/N_{max} = 0$ için hesaplanan θ_p değerinin maksimum değışimi %22.4, $N/N_{max} = 0.1$ için %45.5, $N/N_{max} = 0.2$ için %49.4, $N/N_{max} = 0.3$ için %48.5 ve $N/N_{max} = 0.4$ için %55.1 olarak azalmaktadır. Tablo 6'da özetlenen sonuçlarının incelenmesinden; eksenel yük seviyesinin artması ile ($N/N_{max} = 0 - 0.4$) Tip 1 kolon için hesaplanan θ_p değerinin maksimum değışimi %49.7, Tip 2 kolon için %58.3, Tip 3 kolon için %63.5, Tip 4 kolon için %68.6 ve Tip 5 kolon için %71 olarak azalmaktadır. Tablo 7'de analiz sonuçlarından elde edilen beton birim kısalması; artan sargı donatı aralığına göre ε_c değeri

maksimum %39.1 olarak azalmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, zaman ayırdıkları, kıymetli yorum ve önerilerde buldukları için makaleyi değerlendiren hakemlere teşekkür etmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Acun, B., Sucuoğlu, H., 2011. Betonarme Kolonların Şekildeğiştirme Performans Sınırlarının Deneysel Gözlemlerle Değerlendirilmesi. İMO Teknik Dergi, 22 (108), 5523-5541.
- Aydemir, C., Kırçıl, M. S., Hancıoğlu, B., Zorbozan, M., 2011. Betonarme Kolonların Hasar Sınır Eğriliklerinin Belirlenmesi. İMO Teknik Dergi, 22 (109), 5613-5642.
- Celep, Z., Kumbasar, N., 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Beta Dağıtım, İstanbul, 596s.
- Çavdar, Ö., Bayraktar, E., Çavdar, A., 2015. Mevcut Perdeli Betonarme Bir Yapınoğrusal Olmayan Yöntemle Deprem Performansının Belirlenmesi. International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015), 7-9 May 2015, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Türkiye, 233-241.
- Elçi, H., Göker, K. A., 2018. Comparison of Earthquake Codes (TEC 2007 and TBEC 2018) In Terms of Seismic Performance of RC Columns. International Journal of Scientific and Technological Research, 4 (6), 9-21.
- Foroughi, S., Yüksel, S. B., 2019. Betonarme Kolonların Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11 (2), 584-601.
- Hasgöl, U., Yavaş, A., Türker, K., Terzi, M., Birol, T., 2016. Dbybhy-2007'de Tanımlanan Hasar Kriterlerinin Betonarme Kolon Elemanlar İçin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 21 (2), 499-514.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE, 114 (8), 1804-1826.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., Kowalsky, M. J., 2007. Displacement-based seismic design of structures. IUSS Press, Pavia, Italy.
- SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.2.0. USA.
- Sinani, B., 2014. Mevcut betonarme yapıların deprem performansının analizi. T.C. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- TBDY., 2018. Türkiye bina deprem yönetmeliği. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS500., 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ulutaş, H., 2019. DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) Deprem Yönetmeliklerinin Kesit Hasar Sınırları Açısından Kıyaslanması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 351-359.
- Ulutaş, H., Tekeli, H., Demir, D., 2015. Kesit Hasar Sınırlarının Belirlenmesinde Sargılama Durumunun Etkisi. International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015), 7-9 May 2015, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur-Türkiye.
- Ucar, T., Merter, O., Duzgun, M., 2015. Determination of lateral strength and ductility characteristics of existing mid-rise RC buildings in Turkey, Computers and Concrete, 16 (3), 467-485.



DETERMINING THE EFFECT OF AIR CHAMBERS ON RUBBER INSULATION IN AUTOMOTIVE PARTS FOR SOUND ABSORPTION COEFFICIENT AND TRANSMISSION LOSS

Murat KORU^{1*}, Orhan SERÇE², Osman İPEK³, Hüseyin KARABULUT², Mehtap HIDIROĞLU²

¹ Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Türkiye

² ORAU Orhan Automotive, R&D Center, Bursa, Türkiye

³ Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Türkiye

Keywords

Sound Absorption Coefficient, Sound Transmission Loss, Sound Insulation Properties of Rubbers.

Abstract

In automotive industry, noise from the road, engine and environment are undesirable sounds which impacts the driver and passengers. In automobiles, the connection between the gear shifter mechanism and the transmission is carried out through cables and these cables go through a passage between the engine and the passenger compartment and rubber-based grommet parts are using for insulation. In this study, a phenomenon is investigated for shifter grommet parts. For using low sound transmission speed of air, air chambers are positioned perpendicular to the sound direction in insulation materials and tested with impedance tube of samples transmission loss and sound absorption coefficient. At these tests EPDM samples were used. On these samples, 2 types of air chambers with 4 mm and 6 mm diameter were considered having either 2 or 3 whole body or blind holes. Results showed that in the air chamber with 3 blind holes, test sample results are best up till 8% void in the insulation material. On the other hand, most of the test samples with holes showed better results than the one's without the hole and the results showed that using low sound velocity of air can help to achieve better sound insulation properties in similar applications.

OTOMOTİV PARÇALARINDA KULLANILAN KAUÇUK YALITIM MALZEMELERDE HAVA ODACIKLARININ SES YUTMA KATSAYISI VE İLETİM KAYBINA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Anahtar Kelimeler

Ses Yutma Katsayısı, Ses İletim Kaybı, Kauçukların Ses Yalıtım Özellikleri.

Öz

Otomotiv endüstrisinde yoldan, motordan ve çevreden gelen sesler kabin içi için istenmeyen sesler olup sürücü ve yolcuları etkilemektedir. Araçlarda vites kumanda mekanizması ile şanzıman arasındaki iletişim vites kabloları ile sağlanmaktadır ve bu kablolar kabinden motor bölümü tarafına açılmış olan bir açıklıktan geçerek gider. Bu açıklığın yalıtımı için grommetler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yalıtım için kullanılan grommet parçalar üzerinde bir fenomen incelenmiştir. Havanın düşük ses iletim hızının kullanılması için numunelere sesin geçiş yönüne yatay hava odacıkları konumlandırılmış ve empedans tüpü ile hem ses yutma katsayısı hem de iletim kaybı ölçülmüştür. Testlerde EPDM numuneler kullanılmış olup, odacıklar numunelerde 2 farklı çap da (4 ve 6 mm) ve 2 veya 3 odacık olacak şekilde oluşturulmuştur. Odacık tipleri boydan boya ve kör delik olacak şekilde iki tipte hazırlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 3 adet kör delik bulunan numune en iyi sonuçları vererek, numuneler içerisindeki odacığın hacminin %8'e kadar iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Diğer yandan, çoğu içerisinde odacık açılmış numuneler hiç odacık bulunmayan referans parçaya göre daha iyi yalıtım değerleri göstermiştir. Böylelikle havanın düşük ses iletim hızından faydalanılarak benzer uygulamalarda daha iyi yalıtım sonuçları elde edilebileceği görülmüştür.

* İlgili yazar / Corresponding author: muratkoru@isparta.edu.tr, +90-246-214-6771

Alıntı / Cite

Koru, M., Serçe, O., İpek, O., Karabulut, H., Hıdıroğlu, M., (2020). Determining the Effect of Air Chambers on Rubber Insulation in Automotive Parts for Sound Absorption Coefficient and Transmission Loss, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(4), 1053-1061.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Koru, 0000-0002-6949-645X

O. Serçe, 0000-0001-9422-8249

O. İpek, 0000-0002-1305-023X

H. Karabulut, 0000-0002-7574-7091

M. Hıdıroğlu, 0000-0002-3368-1696

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 30.06.2020

Revizyon Tarihi / Revision Date 12.10.2020

Kabul Tarihi / Accepted Date 12.10.2020

Yayın Tarihi / Published Date 25.12.2020

1. Introduction

Automotive industry is constantly changing because of the user needs and competition. This affects the insulation materials and techniques which are widely used in automobiles. For providing better driving comfort and environment for both the drivers and passengers, automotive manufacturers want to eliminate the noises which come from the road, engine and environment (Batman & Aydın, 2012; Akaydın et al., 2013).

Sound is a form of energy which is transmitted to the environment through waves which causes a pressure change and our ears detect this pressure changes as sound. Noise is a kind of sound which is unpleasant and disruptive to humans. We consider some sounds as noise because of their frequency, pitch and intensity which could be distressing. Some research shows that, noise can cause unwanted effects on human health. From the driver's perspective, unwanted noise could disrupt the driver's concentration which can cause great damage or could even lead to lower hearing capability. Besides this, it can also cause physiological effects like muscle spasms, stress, high blood pressure, change in heart rate and blood circulation, sleeplessness and some psychological effects like anger, fear, nervousness, slower mental activity and lower work efficiency (Batman & Aydın, 2012; Akaydın et al., 2013; Akaydın et al., 2013; Akaydın et al., 2013; Kılınçarslan et al., 2018).

When a source creates a sound, the energy of the sound produced propagates through the air molecules to other molecules and the sound intensity level is defined as the power carried by sound waves per unit area in a direction perpendicular to that area. The SI unit of intensity is watt per square meter (W/m^2). There are two ways to insulate noise. Sound insulation, which deals with basically lowering the sound level and the other being sound absorption. Often these two terms can be mixed with each other. In sound absorption, energy of sound waves rubs to insulation material and some part of the sound energy turns into heat energy. If sound waves encounter anything which has different density or elasticity, some part of the sound energy reflects and some part of it turns into heat energy while the rest just passes through (Kaya & Dalgat, 2017).

Most of the sound, vibration and noise contain various frequencies. Frequency is characterized as a periodic vibration whose frequency is audible to the average human. The SI unit of sound frequency is Hertz (Hz). Period, reciprocal of frequency, is the time to complete one oscillation which remains constant and its SI unit is second (sec). Wavelength is the spatial period of a periodic wave and its SI unit is meter (m). The type of the sound depends on its frequency and low frequency sounds are called bass and high frequency sounds are called sharp sounds. An automobile engine can generate both low frequency and high frequency sounds (ASTM-E 1050, 2006; ASTM-E 2611, 2006).

Best way to measure sound insulation of a material is reverberation room method. But because of the small test equipment and the need of small test specimens, impedance tube method is widely used. With impedance tube both sound absorption coefficient and sound transmission loss can be measured. Diameter of the impedance tube is important for measurement. For low frequency tests, bigger diameter impedance tube is needed and for high frequencies smaller diameter is needed (Batmaz & Aydın, 2012; Akaydın et al., 2013; Akaydın et al., 2013; Akaydın et al., 2013; ASTM-E 1050, 2006; ASTM-E 2611, 2006).

In automobiles, different insulation methods are used for different areas like windshields in car windows, insulation panels at engine compartment, door insulations etc. It is important to achieve good insulation with cheaper solutions for the automotive sector because of the high competition present (Batmaz & Aydın, 2012). In Figure 1 an example of shifter grommet part can be seen.

Rubber materials are widely used in automobiles because of their exemplary absorption properties. As a lot of research and development activities are laid by automotive companies to make their existing parts smaller but sometimes it results in lower insulation capacity which is not suitable enough. During such moments, sometimes manufacturers use another insulation layer or make thicker rubber insulations. But these solutions raise the cost

of insulation solutions. On the other hand, in the literature, sound velocity in rubber materials is 6100 m/s and for air is 329 m/s (Holz rubber ve altındaki). Celerity phenomenon uses these properties and states that if air chambers placed in solid materials, low sound velocity of air helps to obtain better insulation properties.

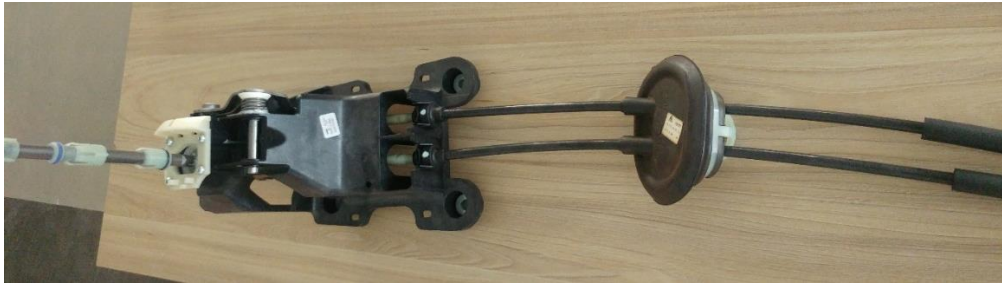


Figure 1. Shifter mechanism and insulation grommet part

There are various studies made about determining sound insulation capabilities of insulation materials with impedance tube. Akaydin et al. 2013, determined acoustic specifications of sound insulation materials with impedance tube. Kaya and Dalgac 2017, determined acoustic properties of natural fibers with impedance tube. Seçgin et al. 2017, determined acoustic properties of insulation materials depend on temperature with special conditioned impedance tube. Asdrubali et al. 2018, determined sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs. Ersoy and El-Hafid 2013, determined sound absorption properties of high-density polyethylene and styrene butadiene rubber polymer composites. Hedayati and Arefazar 2009, determined fillers effect on acoustic absorption properties of EPDM based highly filled particulate composites. El-mansy et al. 2011, worked on in their study, sound absorption coefficient of different insulation materials with measuring at reverberation room. Harjana et al., 2014, worked on sound absorption and sound insulation properties of re-claimed waste tire rubbers. Sikora and Turkiewicz, 2010, study shows that how granular size of rubber insulation materials effects their sound absorption coefficients. And on the other side there are different studies for automotive insulation materials. Batmaz and Aydın 2012, investigate insulation capabilities of EPDM+Mat and PU+Mat with different thickness and determined best solution for automobiles depending on different sound frequencies. Beside these studies, Xu et al. 2018, measured insulation capabilities of perforated high-density polyethylene, recycled rubber and fiberboard sawdust with impedance tube. In this study they made, perforation direction to sound source like ceiling panels for rooms. But during our research in the literature we couldn't find any study directly linked to celerity phenomenon.

In this study, in order to obtain better insulation properties for automobile gear shifter grommet parts, celerity phenomenon has been carried out. For this, air chambers were placed perpendicular to the sound direction in insulation materials. For testing this phenomenon, impedance tube was used to measure both transmission loss and sound absorption coefficient. 29 mm diameter Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) samples were prepared and their insulation properties were measured between 200Hz to 6400Hz. On these samples 4 mm and 6 mm diameter air chambers place 2 or 3-chambers whole body and as blind holes. At the end 6 different types of air chamber were tried. Results which were obtained from the tests are presented systematically in this study.

2. Material and Method

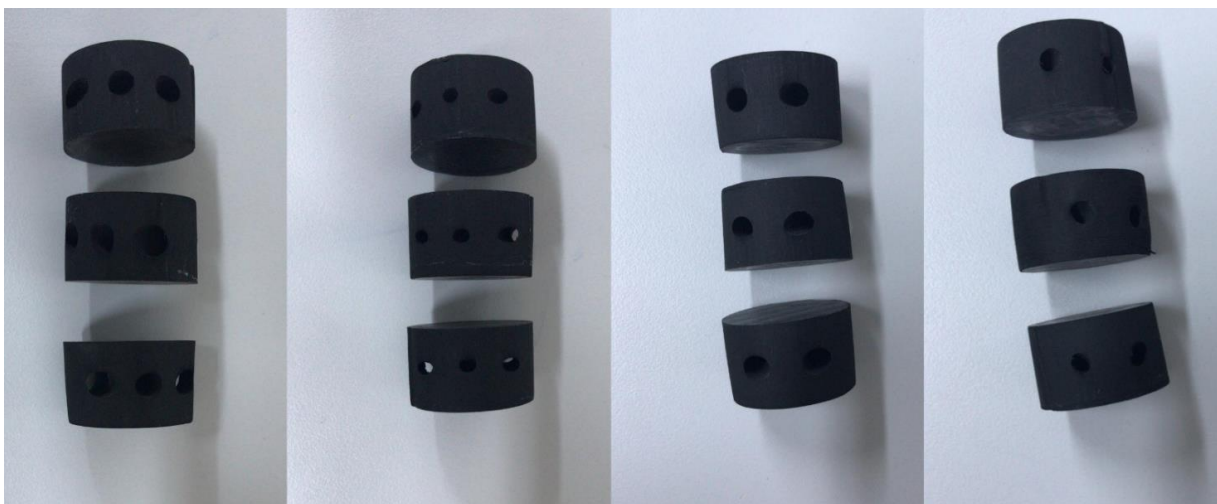


Figure 2. Photos of test samples

With impedance tubes, both sound absorption coefficient and sound transmission loss can be readily measured. There are some application differences for measuring these properties. In this study we used TestSens's impedance tube. This impedance tube can measure low frequencies at 50-1600 Hz with big diameter tube (100 mm) and high frequencies at 200-6400 Hz with small diameter tube (29 mm). The test setup consists of Gras's phase-compatible high precise 46BD model pressure-field microphone set, National Instrument's 4 ICP channel analyzer and its sample rate at 102.4 kS/s. 6 different air chamber shapes were used and 3 pieces of without the air chamber samples for every shape were prepared. Totally 21 test samples were measured with impedance tube to determine their sound absorption coefficient and transmission loss.

Cylindrical, molded EPDM test sample parts were prepared with 29 mm diameter and 18 mm thickness. Subsequently, 6 different chamber shaped samples were prepared by drilling holes. In Figure 2, sample pictures can be seen. In Figure 3, air chamber shapes of sample and sample numbers are illustrated. Sample without chamber is numbered as Sample 0.

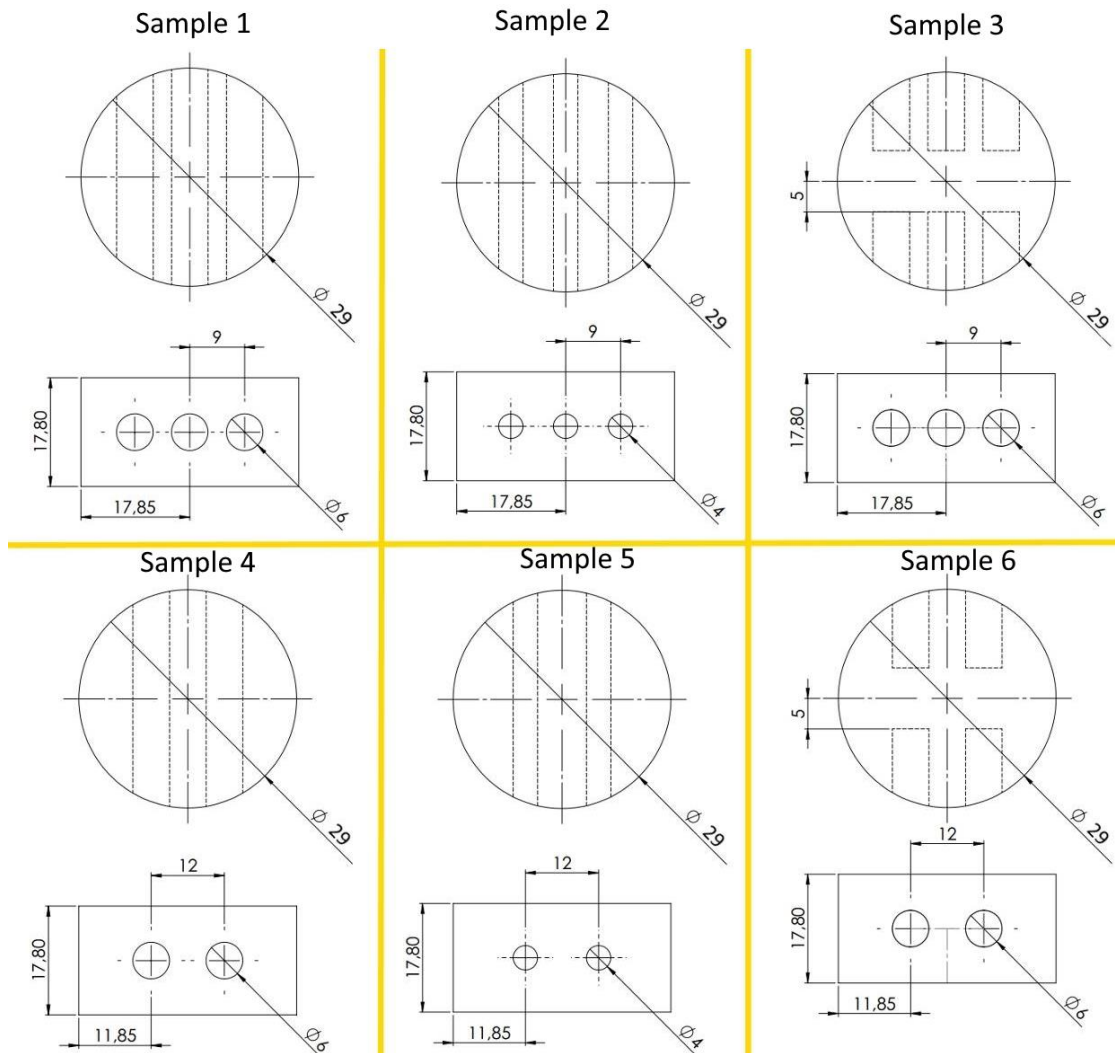


Figure 3. Measurements of air chamber shapes which used in test samples

2.1. Sound Absorption Coefficient Measurement

As mentioned before, sound absorption properties of a material can be considered into two main topics and one of them is sound absorption coefficient. For measuring the sound absorption coefficient of a material, firstly sound waves applied to the material and sound waves reflected from that material must be measured. With this method, the surface impedance of the material can be calculated. In Figure 4, general diagram of the measurement system used is illustrated. The system consists of a speaker which generates white noise and the microphones present measure the pressure of sound waves and using transfer function method, sound absorption coefficient is calculated (ASTM-E 1050, 2006; ASTM-E 2611, 2006; TS EN ISO 10534-1, 2004; TS EN ISO 10534-2, 2003).

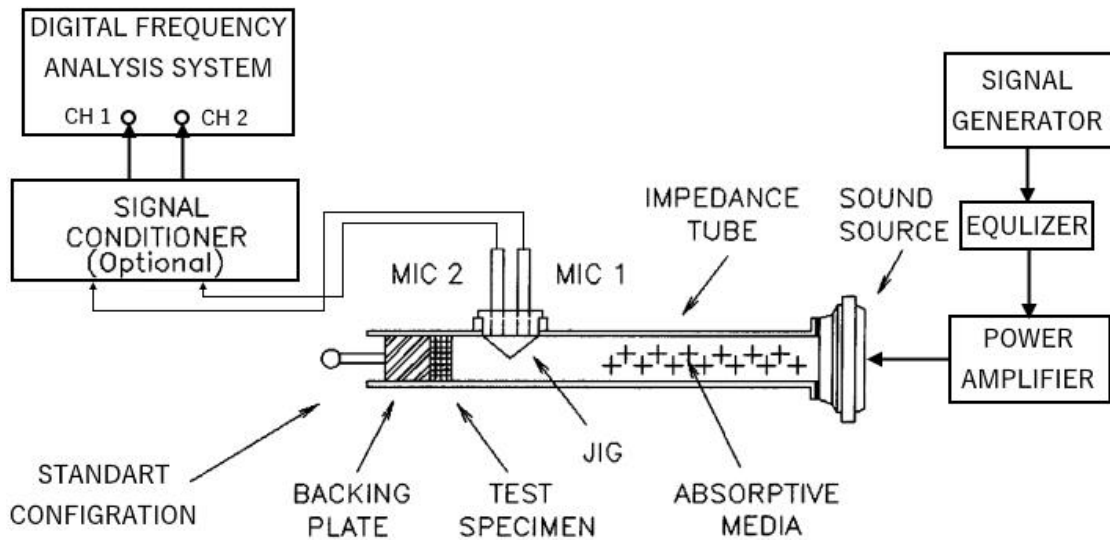


Figure 4. Diagram of sound absorption coefficient measurement system (ASTM-E 1050, 2006)

2.2. Sound Transmission Loss Measurement

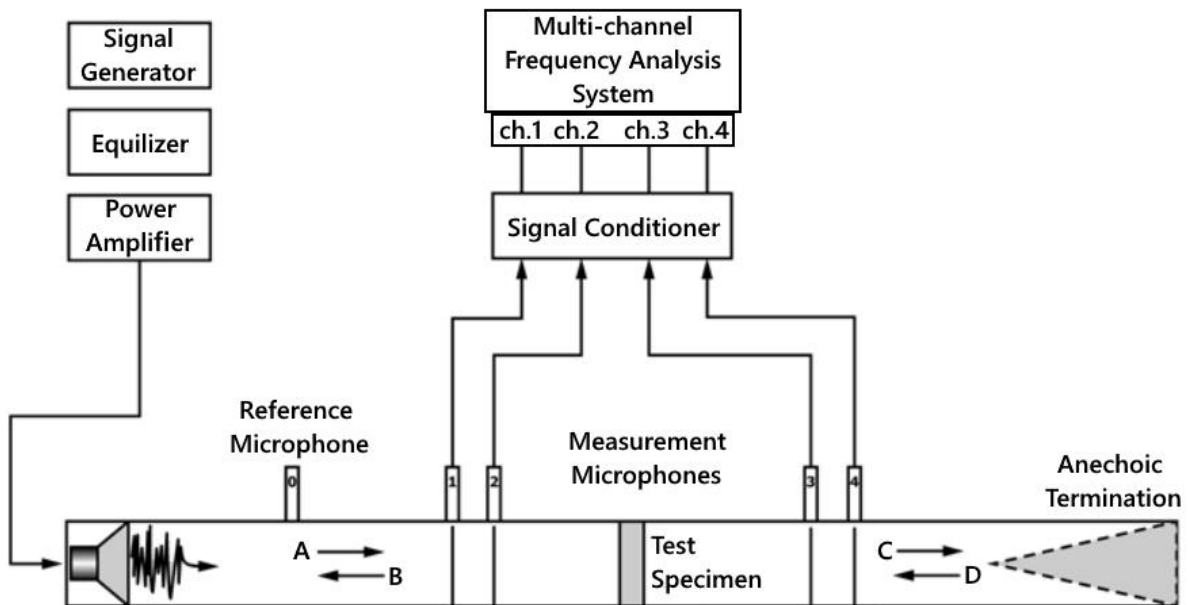


Figure 5. Sound transmission loss measurement system (ASTM-E 2611, 2006)

For measuring sound transmission loss with impedance tube, test sample were placed in the middle of the impedance tube and this way, two chambers were created in the impedance tube. Both chambers were measured with different microphones and their sound transmission loss were calculated. In order to calculate the transmission loss, reflected sound waves at chamber two must be removed from the equations and for this the measurements are repeated with anechoic termination and without it as well. Figure 5 represents the general diagram of measurement system (ASTM-E 1050, 2006; ASTM-E 2611, 2006; TS EN ISO 10534-1, 2004; TS EN ISO 10534-2, 2003).

2.3. Theory

Measuring both sound absorption coefficient and transmission loss lean on same theoretical method. Sound transmission coefficient, τ (dimensionless) of a material in a specified frequency band is the fraction of airborne sound power incident on a material that is transmitted by the material and radiated on the other side of the test specimen.

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (1)$$

Where W_t is the transmitted sound power and W_i is the incident sound power. Sound transmission loss, TL, of a material in a specified frequency band is ten times the common logarithm of the reciprocal of the sound transmission coefficient. The quantity so obtained is expressed in decibels.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_i}{W_t} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (2)$$

The speed of sound in air changes with air temperature and can be calculated with,

$$c = 20.047 \sqrt{273.15 + T} \quad (3)$$

Where c is the speed of sound (m/s) and T is room temperature (C°). Air density, the characteristic impedance of air denoted by ρc , can be found using equation 4.

$$\rho = 1.290 \left(\frac{P}{101.325} \right) \left(\frac{273.15}{273.15 + T} \right) \quad (4)$$

Where ρ , air density (kg/m³), P , atmospheric pressure (kPa). For/In order to measure measuring transmission coefficient with anechoic-backed impedance tube equation 5 can be used.

$$t = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}} \quad (5)$$

Where, t is the transmission coefficient, k is the wave number (m⁻¹), j which equals to $-1-1$. While T_{11} , T_{12} , T_{21} and T_{22} are terms taken from the transfer matrix. Normal incidence transmission loss can be calculated with;

$$TL_n = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{t} \right| \quad (6)$$

Where TL_n is the normal incidence transmission loss. Hard-backed impedance tubes reflection coefficient can be calculated with;

$$R = \frac{T_{11} - \rho c T_{21}}{T_{11} + \rho c T_{21}} \quad (7)$$

Where R is the complex acoustic reflection coefficient. Thus, the absorption coefficient with hard-backed impedance tubes can be calculated with;

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

Characteristic impedance in test specimens can be calculated with equation 9.

$$z = \sqrt{T_{12}/T_{21}} \quad (9)$$

Where, z is the characteristic impedance of propagation in the materials (rayls).

3. Results and Discussion

Sound absorption coefficient measurement results are illustrated in Figure 6. When we look at the figure, results depict the confirmation of the celerity phenomenon. On comparing the measured results of the samples without chambers, we concluded that their sound absorption level is lower than the samples with chambers. When we considered automobiles, we can divide the results like for low frequency from 1 KHz to 2.5 KHz and for high

frequency 2.5 KHz to 4 KHz. Engine sound mostly varies around these frequencies. For the low frequencies sample 3, 4 and 5 resulted almost same around at the peak 0.27. At the other hand sample 1,2 and 6 resulted closed to each other too around 0.2. All of the samples resulted better then samples without chamber for the low frequencies. For the high frequencies results closed to each other except for the sample 6 is better than others from 2.2 KHz to 3.5 KHz. When we took all the frequencies, the best results were demonstrated by sample 5 and 6.

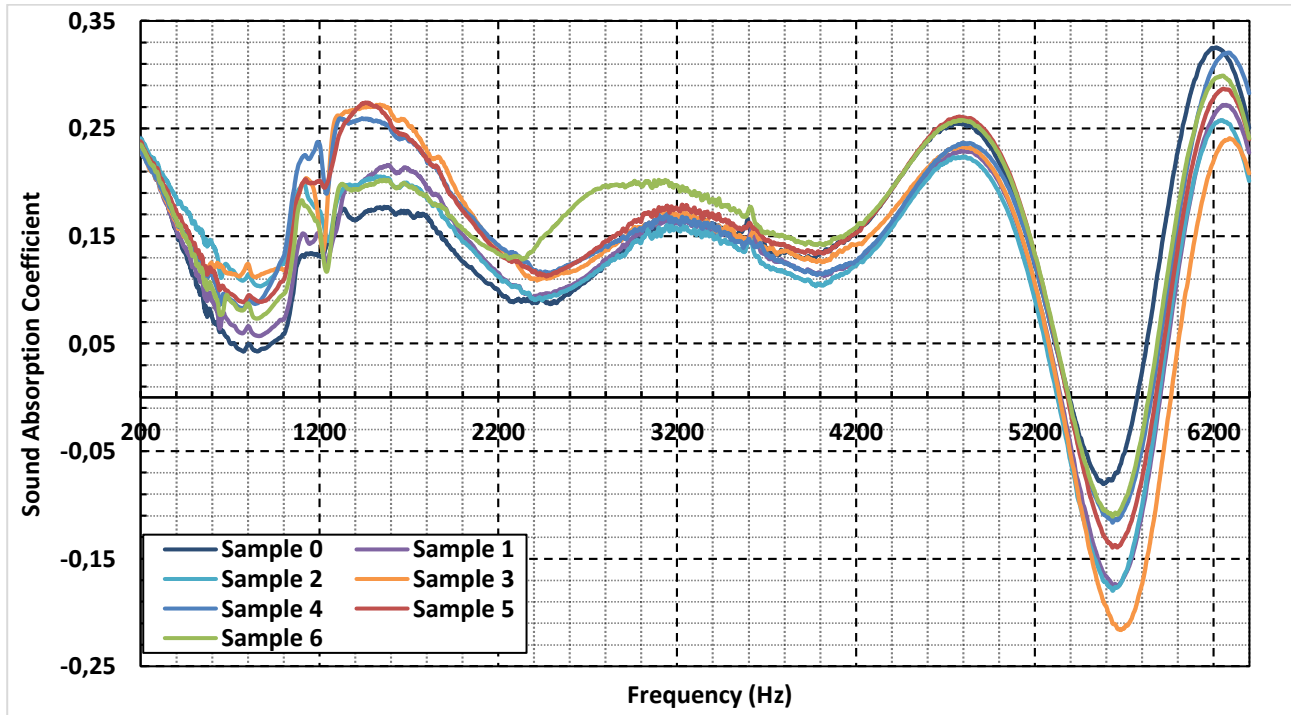


Figure 6. Sound absorption coefficient measurement results

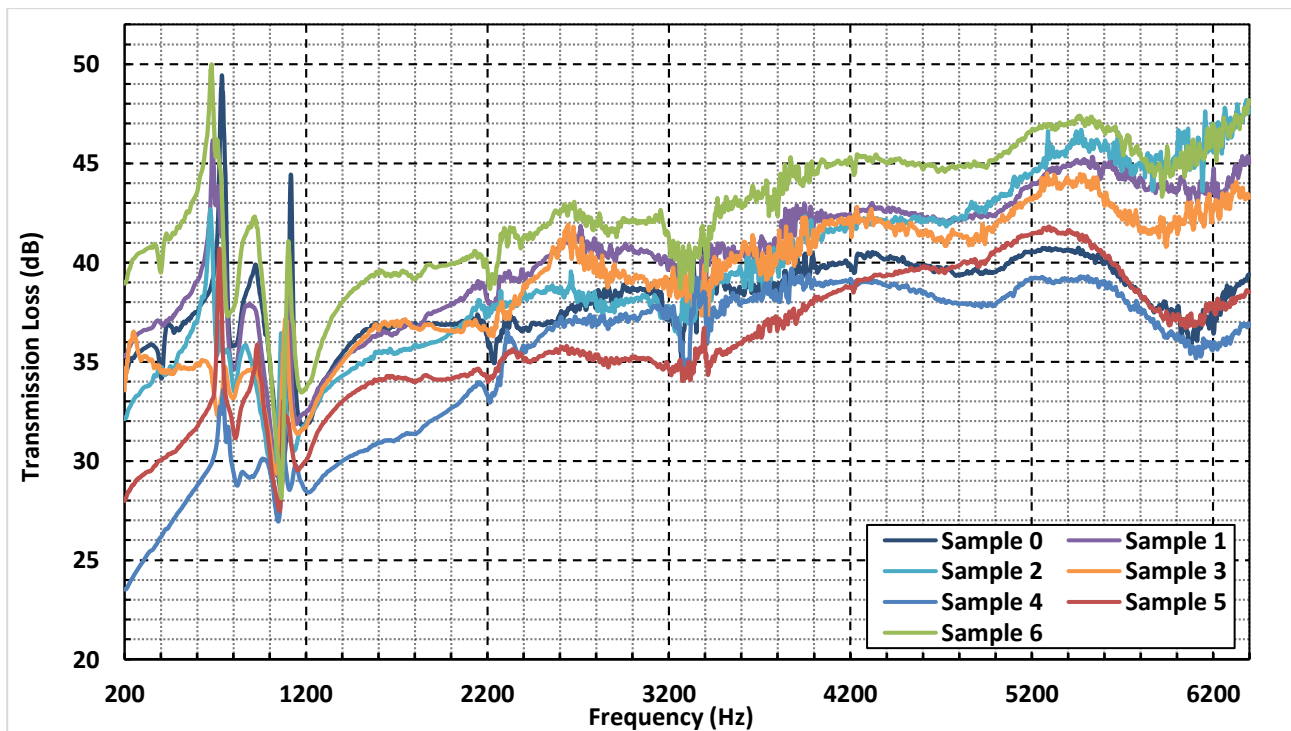


Figure 7. Transmission loss measurement results

On the other hand, transmission loss result of the samples are displayed in Figure 7. When we look at Figure 7, sample 6 shows the best result while sample 1, 2 and 3's transmission loss is better than sample 0. According to this, we can say that the best results for sound absorption coefficient and transmission loss measurements are

represented by all samples except sample 6. But both sound absorption coefficient and transmission loss showed that holes in the solid sound absorption materials can enhance the materials sound absorption properties.

Table 1. depicts the material volume of the samples. When we compare the void volume in the samples to sound absorption properties, we can say that when the void in the samples taken gets higher than 10%, absorption properties gets worsen. The best results were illustrated by sample 6 and percentage of the void in that sample is 8%. But on the other hand, the percentage of sample 2 is almost same as sample 6 but results of sample 6 are much better than the one's from sample 2. So, this shows that blind holes with bigger diameter show better result than through-whole body holes with smaller diameter.

In literature we can't find any study which was focused on this phenomenon, but literature shows that speed of sound is lower in the air than solid materials. And there are also some research which show that porosity in the insulation properties make insulation materials properties better (Liu, 2015). There is a patent EP2857264A1 which is using this property to achieve better insulation properties in rubber-based automobile insulation parts. With this research we obtained similar results and results show that until at some point holes in the solid insulation materials can help to achieve better insulation properties.

Table 1. Solid volume percentage of the test samples

Sample (#)	Volume of Solid Part (mm ³)	Percentage of Rubber Part (%)
0	11757,25	100
1	9674,76	82,29
2	10826	92,08
3	10523,15	89,50
4	10276,34	87,40
5	11096,13	94,38
6	10841,77	92,21

4. Conclusion

In this study, we investigated how holes in insulation materials effects sound absorption coefficient and transmission loss of rubber-based insulation materials. Accordingly, different hole shapes and diameters were used. And the study showed that at some point of the void in the rubber-based insulation, the material achieves better insulation properties like up till 8% void. If void in the insulation increases, the properties of insulation get worse. Hence, the whole shape blind holes show better results. With this study we showed that using low sound velocity in the air can help to achieve better sound absorption properties in insulation materials. At the other hand in this study wide range of frequency band studied which in normally engine sound have smaller range. Focusing on smaller frequency range can help to acquire better sound insulation especially for insulating specific noise sources which is can be useful for further studies about this topic.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Akaydin, O., Akgül, A., Orhon, E., Belek, H. T., 2013. Gürültü Kontrol Elemanlarının Akustik Özelliklerinin Empedans Tüpü ile Belirlenmesi. 10. Ulusal Akustik Kongresi, 1-10.
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S., 2008. Sound Absorbing Properties of Materials Made of Rubber Crumbs. Acoustic'08 Paris, 35-40.
- ASTM-E 1050, 2016. International Standard: Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System, 1-11.
- ASTM-E 2611, 2006. Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method, 1-14.
- Batman, İ., Aydın, İ., 2012. Taşıtlarda Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Ses Yutma Katsayılarının Belirlenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (4), 687-693.
- El-mansy, M. K., Abd-elfattah, Mahmoud, A., Abd-elbaseer, M., Youssif, R. S. 2011. Standart uncertainty of material size effect on sound absorption coefficient in reverberation room. Journal of Applied Sciences Research, 7 (2), 166-173.

- Ersoy, S., El-Hafid, A., 2013. Investigation of Sound Properties of High Density Polyethylene/Styrene Butadiene Rubber Polymer Composites. *Vibroengineering Procedia*, 1, 77-80.
- Harjana, H., Sabino, U., Yahya, I., Kristiani, R., 2014. Sound insulation and absorption properties of re-claimed waste tire rubber. *ICAMST2014*, 1-5.
- Hedayati, A., Arefazar A., 2009. Effects of Filler Characteristics on the Acoustic Absorption of EPDM-based Highly Filled Particulate Composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28 (18), 2241-2249.
- Kaya, A. İ., Dalgarno, T., 2017. Ses Yalıtımı Açısından Doğal Liflerin Akustik Özellikleri. 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal ve Teknik Bilimler Kongresi, 813-827.
- Kılınçarslan, Ş., Davraz, M., Akça, M., 2018. Pomza Agregalı Köpük Betonların Özelliklerinin Araştırılması. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(1), 148-153.
- Liu, Y., 2015. Sound Transmission Through Triple-Panel Structures Lined with Poroelastic Materials. *Journal of Sound and Vibration*, 339; 376-395.
- Seçgin, A., İhtiyaroğlu, Y., Kara, M., Ozankan, A., 2017. Akustik Yalıtım Malzemelerinin Ses Yutma Katsayılarının Farklı Sıcaklık Koşulları Altındaki Değişiminin Deneysel Olarak İncelenmesi. 18. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, 317- 324.
- Sikora, J., Turkiewicz, J., 2010. Sound absorption coefficients of granular materials. *Mechanics and Control*, 29 (3), 149-157.
- TS EN ISO 10534-1, 2004. Akustik-Empedans borularında ses absorplama katsayısı ve empedansın tayini – Bölüm 1: Duran dalga oranını kullanma metodu, 1-24.
- TS EN ISO 10534-2, 2003. Akustik-Empedans borularındaki ses absorpsiyon katsayısının ve empedansın tayini – Bölüm 2: Aktarım fonksiyonu metodu, 1-25.
- Xu, X., Wang, H., Sun, Y., Han, J., Huang, R., 2018. Sound Absorbing Properties of Perforated Composite Panels of Recycled Rubber, Fiberboard Sawdust, and High-Density Polyethylene. *Journal of Cleaner Production*, 187, 215-221.



DOĞAL YAPI TAŞLARININ FİZİKO MEKANİK ÖZELLİKLERİYLE BÖHME AŞINMA DİRENCİNİN TAHMİNİ

ALİ BOZDAĞ*

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

Anahtar Kelimeler

*Böhme Aşınma Direnci,
Doğal Yapı Taşı,
Fiziko-Mekanik Özellikler,
Basit Regresyon,
Çoklu Regresyon.*

Öz

Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak yapı sektöründe doğal yapı taşlarına olan talep her geçen gün artmakta olup doğal taşların kullanım alanlarının doğru tespit edilebilmesi için fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi doğal taşların kullanım alanlarındaki davranışlarının da anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Doğal taşların kullanım alanlarına göre belirlenmesi gereken mekanik özelliklerden birini oluşturan aşınma direncinin tespiti için yaygın olarak kullanılan yöntem Böhme aşınma testidir. Bu çalışma da farklı kökenli kayaçların (magmatik, metamorfik, sedimentar) fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesiyle aşınmaya karşı dayanım dirençlerinin tahmini istatistiksel yöntemlerle incelendi. Bu amaçla Anadolu'nun farklı bölgelerinden farklı kökenli doğal taş örnekleri toplanmış ve bu örneklerde Böhme aşınma deneyi ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Doğal taşların Böhme aşınma direnci ile kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P dalga hızı, Schmidt çekiç değeri, tek eksenli basma değerleri arasındaki ilişkiler basit regresyon ve çoklu regresyon analizleriyle incelenmiştir. Çoklu regresyon analiziyle geliştirilen denklem yardımıyla belirlenen Böhme aşınma direnç değerleri ile deneysel yöntemlerle belirlenen Böhme aşınma direnç değerleri arasında $R^2=0,92$ olarak belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile farklı doğal taşların aşınma direncinin tahmininde Böhme aşınma testinden farklı olarak diğer fiziko-mekanik özelliklerden elde edilebilecek denklemler geliştirilmiştir.

ESTIMATION OF BOHME ABRASION RESISTANCE THROUGH THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL BUILDING STONES

Keywords

*Böhme Abrasion Resistance,
Natural Building Stone,
Physico-Mechanical
Properties,
Simple Regression,
Multiple Regression.*

Abstract

Due to the increase in the world population, the demand for natural building stones in the building sector is increasing day by day, and it is necessary to determine the physico-mechanical properties of natural stones in order to accurately determine the usage areas. In addition, determining the physico-mechanical properties is important in terms of understanding the behavior of natural stones in their usage areas. The commonly used method for determining the abrasion resistance, which constitutes one of the mechanical properties that should be determined according to usage areas, is the Böhme abrasion resistance test. In this study, by determining the physico-mechanical properties of rocks having the different origin (igneous, metamorphic, sedimentary), the strength resistance to the abrasion resistance of the rocks was investigated by statistical methods. For this purpose, natural stone samples with different origin were collected from different regions of Anatolia, and physico-mechanical experiments and the Böhme abrasion resistance tests were carried out. Relationships between Böhme abrasion resistance and dry density, porosity, water absorption by weight, P-wave velocity, Schmidt hammer value, uniaxial compressive strength values of natural stones were investigated with simple regression and multiple regression analysis. A high positive correlation ($R^2=0.92$) was determined between the Böhme abrasion resistance values determined by the equation obtained from multiple regression analysis and the Böhme abrasion resistance values determined by experimental methods. With this study, equations that can be obtained from other physico-mechanical properties,

* İlgili yazar / Corresponding author: abozdag@ktun.edu.tr, +90-332-205-1959

different from the Böhme abrasion resistance test, were developed for the estimation of the abrasion resistance of different natural stones.

Alıntı / Cite

Bozdağ, A., (2020). Doğal Yapı Taşlarının Fiziko Mekanik Özellikleriyle Böhme Aşınma Direncinin Tahmini, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1062-1071.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A.Bozdağ, 0000-0003-2590-8798

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	20.07.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	30.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Doğal taşların mühendislik yapılarında kullanılmadan önce, aşınma davranışının o mühendislik yapısı için uygun olup olmadığına karar verilmesinde, aşınma direncinin tespit edilmesi son derece önem arz etmektedir. Kullanılan farklı türdeki doğal taşların aşınma dirençleri de farklılıklar göstermektedir. Doğal taşların aşınma dirençlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan standart, EN 14157 (2004) olup, bu standartta özellikle döşeme taşı olarak kullanılacak doğal taşların aşınmaya karşı dirençlerinin belirlenmesinde 3 farklı yöntem önerilmektedir. Bunlar, Wide Wheel, Böhme ve Amsler aşınma yöntemleridir. Standartta özellikle son yıllarda yeni yeni kullanılmaya başlanan Wide Wheel yönteminin referans yöntem olarak kullanıldığı belirtilir. Böhme aşınma yöntemi ise uzun yıllardır en yaygın şekilde kullanılan yöntemdir.

Doğal taşların fiziko-mekanik özellikleriyle aşınma dirençleri arasındaki ilişki birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (MacGrego ve Chiu, 2000; Kahraman ve Günaydın, 2007; Kahraman ve Fener, 2008; Yavuz vd., 2008; Çobanoğlu ve Çelik, 2010, 2017; Çelik vd., 2014; Kahraman ve Kılıç, 2017; Ureel ve Momaye, 2017; Aksoy, 2018; Çelik, 2018; Strzałkowski vd., 2020). Doğal taşların kullanım alanlarının doğru tespit edilmesinde oldukça büyük öneme sahip olan ve 1950'li yıllarda geliştirilen (Karaca vd., 2012) Böhme aşınma direncinin belirlenmesine yönelik birçok farklı çalışma mevcuttur. Gökçe (2014), travertenlerin tabakalanmaya paralel ve dik yöndeki Böhme aşınma direnci değerlerini araştırmış ve aşınma yüzeyindeki boşluk alan oranı ile Böhme aşınma direnci değeri arasında doğrusal ilişkinin olduğunu belirlemiştir. Karaca vd., (2010) ve Çobanoğlu ve Çelik (2010), karbonatlı kayalarda Böhme ve Geniş Disk aşınma değerlerinin donma-çözünme çevrimlerine bağlı olarak değişimini araştırmıştır. İnce (2013) ise farklı kayaç türlerinin farklı donma-çözünme çevrimleri ile Böhme aşınma direnci arasındaki değişimi belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmış ve donma çözünme döngülerinin artmasıyla Böhme aşınma kaybının arttığını belirlemiştir. Mohammed (2018) kayaçların temel indeks özellikleri ile Böhme aşınma kaybı arasında oldukça yüksek korelasyon katsayıları belirlemişlerdir. Bozdağ (2013) ise farklı kayaç grupları (sedimanter, mağmatik ve metamorfik) üzerinde tuz kristallenmesi deneyleri yaparak kayaçların Böhme aşınma dirençlerindeki değişimleri araştırmıştır. Yavuz vd., (2005) mermerlerin tane boyutu, Shore sertlikleri ve nokta yük indeksi ile aşınma değerleri arasında anlamlı ilişkiler bulmuşlardır. Gökten ve Emir (1996) yaptıkları çalışmada Böhme aşınma direnci ile Rockwell sertlikleri arasındaki ilişkiyi inceleyerek anlamlı korelasyonlar bulmuşlardır.

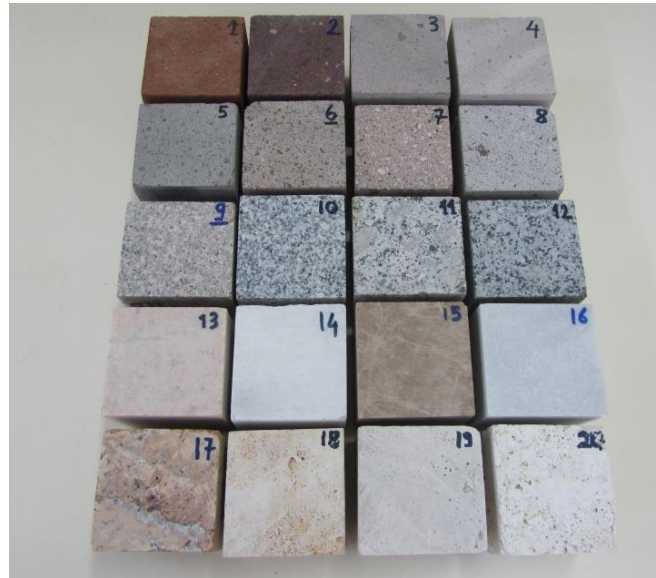
Özellikle son yıllarda hızla gelişmekte olan dünyada arz-talep döngüsünün sürdürülebilir dengesi her alanda olduğu gibi doğal yapıtaş sektöründe de en önemli konulardan birisidir. Doğal taşların fiziko- mekanik özelliklerinin belirlenmesi kullanım alanlarının doğru seçilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Böhme aşınma direnci testi ise, aşınma direncini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Fakat gerek dünyada gerekse Türkiye'de yaygın olarak uygulanan Böhme aşınma direnci testi oldukça zahmetlidir. Bu deneysel çalışma kapsamında, 20 farklı ocaktan alınan doğal taşların aşınmaya karşı direncini tahmin etmek amacıyla kayacın fiziko-mekanik özellikleri (kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P dalga hızı, Schmidt çekiç değeri ve tek eksenli basma değerleri) ve Böhme aşınma direnci arasındaki ilişkiler basit ve çoklu regresyon analizleri ile araştırılmıştır. Böylece, doğal yapı taşlarının fiziko-mekanik değerlerinden yararlanılarak elde edilen eşitliklerden Böhme aşınma dirençlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada farklı kökenli Türkiye'nin farklı şehirlerindeki (Bitlis, Nevşehir, Kayseri, Aksaray, Afyonkarahisar, Eskişehir, Ankara, Çankırı, Erzurum, Çanakkale, Kırıkkale, Adıyaman, Karaman ve Konya) ocaklardan toplam 20 adet doğal taş örneği toplanmış olup örnekler 7*7*7 cm boyutlarında küp haline getirilmiştir. (Şekil 1, 2).



Şekil 1. Çalışmada kullanılan örneklere ait lokasyon haritası (Location map of the samples used in the study)



Şekil 2. Çalışmada kullanılan örnekler (Samples used in the study)

Toplanan doğal taşların mineralojik bileşimini belirlemek için her bir örnekten TS EN 12407 (2002) belirtilen hususlara göre ince kesit hazırlanmış ve optik mikroskop altında incelenmiştir (Tablo 1). Örneklerin fiziksel özellikleri (kuru yoğunluğu, porozite, ağırlıkça su emme) ve tek eksenli sıkışma dayanımları EN 1936 (2006), EN 13755 (2008) ve EN 1926 (2006) standartlarında belirtilen özelliklere göre yapılmıştır. Doğal taşların en önemli mekanik parametrelerinden birisi olan tek eksenli sıkışma dayanım değerini belirlemek için 2000 kN kapasiteli pres kullanılmış ve numuneye sabit bir gerilme hızında $1 \pm 0,5$ MPa/s yük uygulanmıştır. Schmidt çekici değeri ve P-dalga hızları sırasıyla, ASTM D5873 (2014) ASTM E494 (2010) standartlarında önerilen esaslara göre yapılmıştır. Schmidt çekici değeri deneyinde L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. P-dalga hız değerleri ise 54 kHz band genişliğinde, alıcı ve verici dönüştürücülere sahip Proceq marka Pundit Lab Plus test cihazıyla, örneklerin paralel, düz ve pürüzsüz yüzeylerinde direkt ölçüm yöntemiyle ölçülmüştür. Böhme aşınma direnci (BAD) deneyi ise EN 14157 (2004)'de önerilen yöntemlere uygun olarak belirlenmiştir.

BAD değerini belirlemek amacıyla ilk olarak kuru kütlesi (mi) belirli olan bir numune Böhme aşınma cihazı üzerinde bulunan hücreye yerleştirilmiş ve cihaz üzerinde bulunan sürtünme şeridinde yaklaşık $20 \pm 0,5$ gr aşındırma tozu uygun biçimde serpilmiştir. Ayrıca cihaza, numunenin temas ettiği yüzeye yaklaşık 294 ± 3 N yük gelecek şekilde ağırlık uygulanmıştır. Daha sonra Böhme cihazı çalıştırılmıştır. Cihaz çalışırken döner disk 22 kez devir atar ve böylece 1 döngü tamamlanmış olur. Her döngüden sonra, temas bölgesi temizlenmiş ve numune 90° döndürülmüştür. Bu şekilde birbirini takip eden işlemler 16 kez tekrarlanmış ve sonra numunenin kütlesi (mf) tekrar belirlenerek deney sonuçlandırılmıştır. Aşağıdaki eşitlik 1'den yararlanarak numune hacmindeki azalma tespit edilmiştir.

$$BAD = \frac{mi-mf}{\rho_d} \quad (1)$$

BAD= Böhme aşınma direnci, cm³/50cm²

mi= İlk kuru kütle, gr

mf= Son kuru kütle, gr

ρ_d =Kuru yoğunluk gr/cm³

Tablo 1. Doğal taş örneklerinin alındığı bölge, rengi, mineral bileşimi ve petrografik tanımlaması (The region where the natural stone samples were taken, and color, mineral composition and petrographic identification of the natural stone samples)

No	Bölge	Renk	Mineral Bileşimi	Kayaç Adı	Kayaç Tipi
1	Ahlat/ Bitlis	Kahverengi	V,Pl,Kp,P,K,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
2	Nevşehir	Bordo	V,Pl,Kp,P,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
3	Kayseri	Gri	V,Pl,B,H,P,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
4	Gülşehir/ Aksaray	Gri	V,P,B,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
5	İşcehisar/ Afyonkarahisar	Gri	Pl,P,B,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
6	Sivrihisar/ Eskişehir	Pembe	Pl,P,H,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
7	Sincan/ Ankara	Pembe	Pl,V,H,B,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
8	Çankırı	Gri	Pl,H,B,K,A,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
9	İspir/Erzurum	Pembe	Pl,O,K,H,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
10	Çanakale	Gri	Pl,O,B,H,K,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
11	Ulaş/Kırıkkale	Gülkurusu	K,Pl,H,O,S,Z,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
12	Keskin/ Kırıkkale	Gri-yeşil	Pl,H,K,O,B,S,Z,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
13	Afyonkarahisar	Açık Pembe	D,Ka	Mermer	Metamorfik
14	Afyonkarahisar	Beyaz	Ka,D	Mermer	Metamorfik
15	Adıyaman	Açık Kahve	Ka,D	Mermer	Metamorfik
16	Yunak/Konya	Açık Gri	D	Dolomit	Metamorfik
17	Seydişehir/Konya	Kahve-sarı	Ka	Traverten	Sedimanter
18	Karaman	Kirli Sarı	Ka	Traverten	Sedimanter
19	Polatlı/ Ankara	Kirli Beyaz	Ka	Traverten	Sedimanter
20	Ereğli/ Konya	Beyaz	Ka	Traverten	Sedimanter

V: Volkanik cam, Pl: Plajiyoklas, Kp:Kayaç parçası, P: Proksen, K: Kuvars, B: Biyotit, H: Hornblend, Op: Opak mineral, A: Apatit, S: Sfen, Z: Zirkon, O: Ortoklas, D: Dolomit, Ka: Kalsit.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Çalışmada kullanılan mağmatik (piroklastik, volkanik, derinlik), metamorfik ve sedimanter kayaçların Böhme aşınma direnci ve fiziko-mekanik (kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P-dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı, Schmidt çekici) değerleri ile bu verilere ait istatistiksel sonuçları Tablo 2'de verilmektedir.

3.1. Doğal taşların fiziksel özellikleri (Physical properties of natural stones)

3.1.1. Kuru yoğunluk (ρ_d), Porozite (n) ve Ağırlıkça su emme (Wa) testleri (Dry density, porosity and water absorption by weight tests)

Doğal taşlardan elde edilen kübik numunelerde standartlarına uygun olarak, kuru yoğunluk, porozite ve ağırlıkça su emme değerleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan doğal taşların temel fiziksel özelliklerinden kuru yoğunluk değerleri 1,41-2,81 gr/cm³ arasında değişirken, Porozite değerleri ise % 0,70 ile % 34,51 arasında ve ağırlıkça su emme değerleri ise % 0,27 ile % 24,43 arasında değişim göstermektedir (Tablo 2). NBG (1985) kuru yoğunluk sınıflamasına göre doğal taşlar çok düşük ile yüksek yoğunluklu kaya sınıfı arasında değişmektedir. NBG (1985) sınıflamasına göre örneklerin porozite değerleri; 1 nolu örnek çok yüksek, 2-8 nolu örnek yüksek, 9-16 nolu örnek düşük, 17-19 nolu örnek orta ve 20 nolu örnek yüksek sınıfta yer almaktadır.

Tablo 2. Doğal taş örneklerinin fiziko-mekanik özellikleri (ρ_d : Kuru yoğunluk, n : porozite, W_a : Ağırlıkça su emme, V_p : P-dalga hızı, TSD : Tek eksenli sıkışma dayanımı, $S\check{C}D$: Schmidt çekici değeri, BAD : Böhme aşınma direnci) (Physico-mechanical properties of natural stone samples (ρ_d : Dry density, n : porosity, W_a : Water absorption by weight, V_p : P-wave velocity, TSD : Uniaxial compressive strength, $S\check{C}D$: Schmidt hammer value, BAD : Böhme abrasion resistance))

Numune No	Test sayısı	ρ_d gr/cm ³	n %	W_a %	V_p km/s	$S\check{C}D$	TSD MPa	BAD cm ³ /50cm ²
1	7	1,41	34,51	24,43	2,13	15	10,50	35,11
2	7	1,83	18,63	10,15	3,14	26	40,63	13,03
3	7	2,06	12,14	5,88	3,80	40	83,39	7,10
4	7	1,85	19,08	10,29	3,36	33	75,16	8,90
5	7	2,14	11,41	5,34	4,01	36	67,20	15,51
6	7	2,27	7,84	3,45	4,81	38	70,22	6,76
7	7	2,21	8,93	4,04	3,78	40	75,40	5,78
8	7	2,22	10,81	4,88	3,71	42	92,12	10,84
9	7	2,60	1,43	0,55	4,70	54	170,02	1,88
10	7	2,63	0,94	0,36	5,21	53	158,55	1,62
11	7	2,70	1,56	0,58	4,37	51	140,43	2,38
12	7	2,66	1,04	0,39	4,78	54	188,13	2,03
13	7	2,81	1,12	0,40	3,55	44	126,18	8,64
14	7	2,68	0,82	0,31	3,89	34	72,80	13,40
15	7	2,66	1,14	0,43	6,03	42	98,20	7,40
16	7	2,61	0,70	0,27	5,82	40	78,57	12,04
17	7	2,48	3,18	1,28	3,29	36	54,11	18,70
18	7	2,37	3,74	1,58	3,90	34	37,21	16,67
19	7	2,46	2,13	0,87	3,02	34	34,30	17,46
20	7	1,94	10,53	5,43	2,03	16	13,24	28,52
Minumum		1,41	0,70	0,27	2,03	15,00	10,50	1,62
Maksimum		2,81	34,51	24,43	6,03	54,00	188,13	35,11
Ortalama		2,33	7,58	4,04	3,97	38,10	84,32	11,69
S. Sapma		0,37	8,70	5,76	1,05	10,82	50,08	8,74

3.1.2. P-dalga hızı (V_p) testi (P-wave velocity test)

Tahribatsız bir test yöntemi olan V_p testi hem laboratuvarında hem de sahada uygulanabilir. V_p testleri pratik ve ekonomik olmasından dolayı doğal taşların mekanik özelliklerinin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada doğal taşların aşınma değerleri ile ilişkisini ortaya çıkarmak amacıyla V_p değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonucunda elde edilen P dalga hızı en düşük 2.03 km/s ile 20 nolu traverten örneğinde, en yüksek ise 6.03 km/s ile 15 nolu mermer örneğinde ölçülmüştür (Tablo 2).

3.1.3. Schmidt çekici değeri ($S\check{C}D$) testi (Schmidt hammer value test)

Schmidt çekici doğal taşların yüzey sertliklerinin hasarsız ve pratik olarak hem arazide hem de laboratuvarında belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışılan örneklerin yüzey sertlikleriyle ve aşınma dirençleri arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için Schmidt çekici testi yapılmıştır. Elde edilen verilere göre örneklerin $S\check{C}D$ 15-54 arasında değişmektedir (Tablo 2). ISRM (1978) $S\check{C}D$ sertlik sınıflamasına göre; magmatik kayalar az yumuşak-oldukça sert, metamorfik kayalar az sert-sert, sedimanter kayalar ise az yumuşak-az sert sınıfındadır.

3.2. Doğal taşların mekanik özellikleri (Mechanical properties of natural stones)

3.2.1. Tek eksenli sıkışma dayanım (TSD) testi (Uniaxial compressive strength test)

Yapılan deneylerden elde edilen verilere göre çalışmada kullanılan örneklerin TSD değerleri 10,50-188,13 MPa arasında değişmektedir (Tablo 2). Kayalar ISRM (1979) sınıflamasına göre; 1 ve 20 nolu örnekler düşük dayanımlı, 2,18 ve 19 nolu örnekler orta-düşük dayanımlı, 3-8 ve 14-17 nolu örnekler orta dayanımlı ve 9-13 nolu örnekler ise yüksek dayanımlı sınıfına girmektedir.

3.2.2. Böhme aşınma direnci (BAD) testi (Böhme abrasion resistance test)

Standartta önerilen yöntemlere uygun olarak yapılan Böhme aşınma direnci (BAD) deneyi sonuçlarına göre, çalışılan doğal taşların BAD değerleri 1,62 ile 35,11 cm³/50cm² arasında değişmektedir (Tablo 2). Aşınma değerleri incelendiğinde, en yüksek aşınma direnç değeri piroklastik kayalardan 1 nolu örnekte bulunmuştur. En düşük aşınma direnç değeri ise derinlik kayalardan 10 nolu örnekte tespit edilmiştir.

4. Deney Verilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Test Data)

4.1. Doğal taşların fiziko-mekanik özellikleri ile Böhme aşınma direnci arasındaki ilişkilerin istatistiksel yöntemlerle araştırılması (Investigation of the relationship between physico-mechanical properties of natural stones and Böhme abrasion resistance by statistical methods)

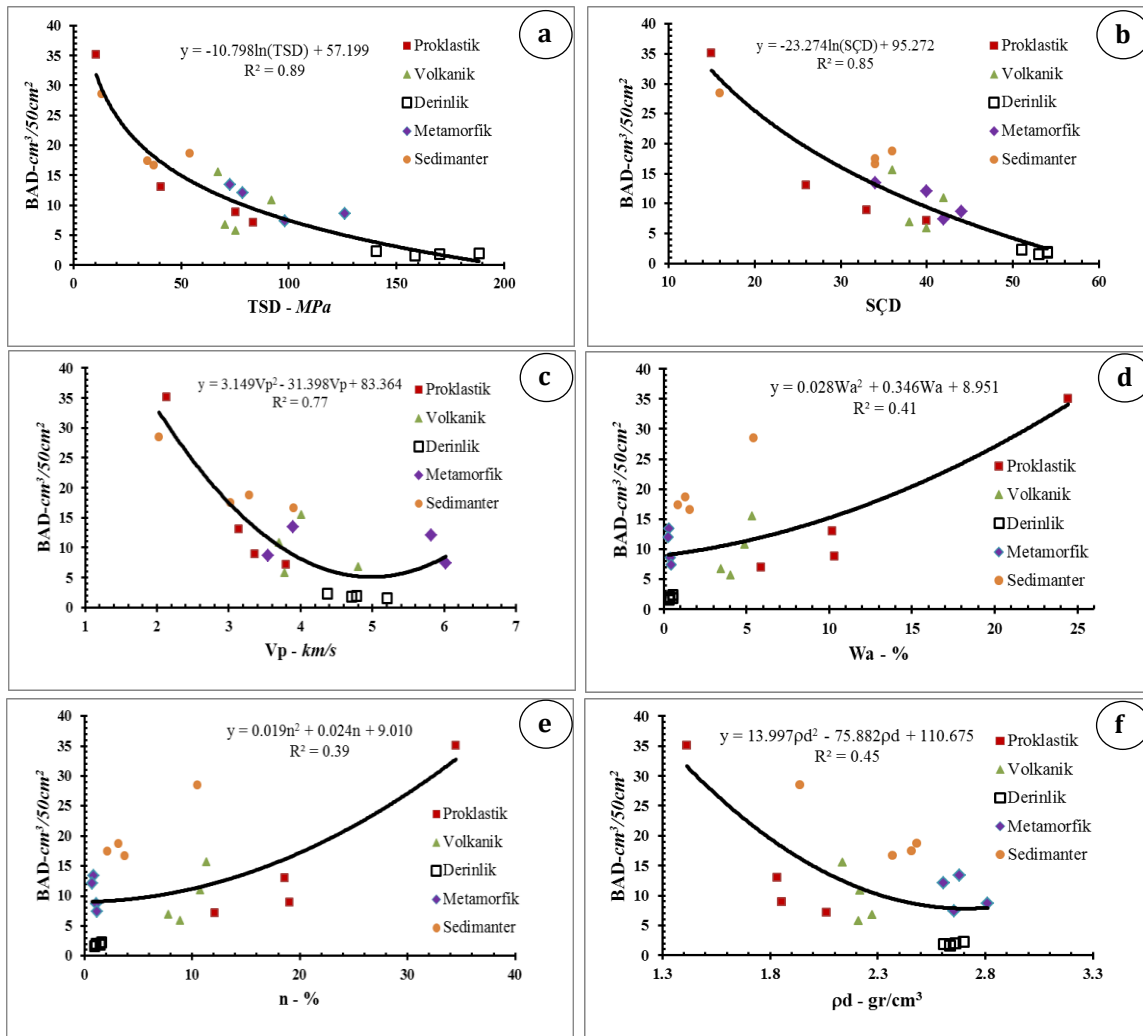
Doğal taşların Böhme aşınma direnç değerleri ile fiziko-mekanik özellikleri (ρ_d , n, Wa, Vp, SÇD, TSD) arasındaki ilişkileri modellemek için SPSS-21 programı yardımıyla basit ve çoklu regresyon analizleri yapılmış ve çeşitli eşitlikler üretilmiştir.

4.1.1. Basit regresyon analizi (BRA) (Simple regression analysis)

Doğal taşların kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P-dalga hızı, Schmidt çekici değeri, Tek eksenli sıkışma dayanımı ile Böhme aşınma direnç değerleri arasındaki ilişkileri modellemek için basit regresyon analizinden yararlanılmıştır. BRA vasıtasıyla doğal taşların BAD değerleri ile fiziko-mekanik değerleri arasındaki ilişkiler doğrusal, üs, üstel, logaritmik ve polinomsal fonksiyonlar kullanılarak incelenmiş ve en yüksek korelasyona sahip denklemler Şekil 3'de verilmiştir. Doğal taşların fiziko-mekanik özellikleri ile Böhme aşınma değerleri arasındaki en iyi ilişkiyi gösteren denklemlere ait korelasyon katsayıları 0,39 ile 0,89 arasında değişmektedir. BAD değeri ile ρ_d arasında R² değeri 0,45 olan negatif polinomsal eğilim türü gözlenmiştir. Doğal taşların n ve Wa değerlerinin artmasıyla BAD değerinin arttığı belirlenmiştir. BAD değeri ile n ve Wa arasında R² değerleri sırasıyla 0,39 ve 0,41 olan pozitif polinomsal eğilim türü gözlenmiştir.

İncelenen örneklerin TSD, SÇD, Vp değerleri ile BAD değerleri arasında yüksek negatif ilişki bulunmaktadır. BAD değerleri ile TSD, SÇD, Vp değerleri arasındaki eğilim türü sırasıyla logaritmik, logaritmik ve polinomsal olup, R² değerleri ise sırasıyla 0,89, 0,85 ve 0,77 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada basit regresyon analiziyle BAD değerlerini tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin geçerliliğini incelemek için % 95 güven aralığı seçilmiş olup F ve t testleri aracılığıyla kullanılabilirliği kontrol edilmiştir (Tablo 3). Ayrıca çalışmada kullanılan 20 farklı doğal taşın örnek kitlesi için tablo F değeri 4,38 ve tablo t-değeri 1,73 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. BAD ile fiziko-mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler (Graphs showing the relationship between BAD and physico-mechanical properties) a) BAD-TSD; b) BAD-SÇD; c) BAD-Vp; d) BAD-Wa; e) BAD-n; f) BAD- ρ_d

Tablo 3. BAD değerlerini tahmin edebilmek için BRA ile türetilen denklemler ve varyans analizi (BRA-derived equations and variance analysis to estimate BAD values)

Değişken	Geliştirilen Eşitlik	R ²	F test	P<0,05	t test	P<0,05
TSD	BAD = 57,199-10,798lnTSD	0,894	151,282	0,000	-12,300	0,000
SÇD	BAD = 95,272-23,274lnSÇD	0,846	99,240	0,000	-9,962	0,000
Vp	BAD = 83,364+3,149Vp ² -31,398Vp	0,774	29,038	0,000	-5,358	0,000
Wa	BAD = 8,951+0,028Wa ² +0,346Wa	0,414	6,015	0,011	0,817	0,425
n	BAD = 9,010+0,019n ² +0,024n	0,389	5,421	0,015	1,166	0,260
ρ _d	BAD = 110,675+13,997ρ _d ² -75,882ρ _d	0,446	6,852	0,007	-1,659	0,115

BRA ile elde edilen varyans sonuçları incelendiğinde TSD, SÇD, Vp, Wa, n ve ρ_d özelliklerine göre geliştirilen eşitliklerden hesaplanan F testine ait p değerinin önem katsayısı (α) 0,05 değerinden küçük olduğu görülmüştür. Fiziko-mekanik özelliklere göre geliştirilen eşitliklerden hesaplanan F değerleri tablo F değerinden büyüktür. Ayrıca TSD, SÇD ve Vp ait eşitliklerden elde edilen t testine ait p değerinin önem katsayısı ise (α) 0,05 değerinden küçük iken, diğer eşitliklere ait p değerinin önem katsayısı (α) 0,05 değerinden büyüktür. TSD, SÇD ve Vp değerlerine ait eşitliklerden hesaplanan t değerleri, tablo t den büyük iken, Wa, n ve ρ_d değerlerine ait eşitliklerden hesaplanan t değerleri, tablo t den küçük olduğu bulunmuştur. Eşitliklerden hesaplanan p değeri önem katsayısı (α) 0,05 üstünde olan denklemler tahmin amaçlı kullanılamazken önem katsayısı (α) 0,05 altında olan eşitlikler tahmin amaçlı kullanılabilir. Tahmin amaçlı kullanılacak denklemlerdeki verilerin elde edilme imkanları (zaman ve maliyet bakımından, tekrarlanma ve örselenme durumları, laboratuvar ve arazi koşullarında yapılması vb.) birbirinden farklıdır. Geliştirilen denklemlerdeki verilerin elde edilme imkanlarının birbirinden farklı olması, araştırmacıya belirlenecek değeri elde edebilme imkanına göre seçenek oluşturması açısından oldukça önemlidir. Yapılan basit regresyon analizlerinde geliştirilen denklemlerin tek bağımsız değişkene göre oluşturulması, denklemin daha pratik ve hızlı olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

4.1.2. Çoklu regresyon analizi (ÇRA) (Multiple regression analysis)

Doğal taşların BAD değerinin tahmin etmek için bağımsız değişkenler (ρ_d , n, Wa, Vp, SÇD, TSD) kullanılmış ve % 95 güven aralığında çoklu regresyon analiziyle incelenmiştir. Seçilen bağımsız değişkenler kullanılarak BAD değerlerinin tahmini için 57 farklı alt kümeden oluşan eşitlikler geliştirilmiştir ve belirleme katsayıları bulunmuştur. ÇRA ile BAD değerlerini tahmin etmek için geliştirilen en iyi alt kümeye ait eşitliğin geçerliliği varyans analiziyle kontrol edilmiştir. Çoklu regresyon analiziyle elde edilen en iyi alt kümeye ait denklemin istatistiksel sonuçları ve regresyon modelin varyans analizi değerleri Tablo 4 ve 5'de verilmiştir. Yapılan varyans analizi ile geliştirilen eşitliklerin geçerliliğinin kontrolü için, p değerinin 0.05 den küçük olması şartı aranmıştır. BAD değerinin tahmini için, geliştirilen eşitlikler içerisinde % 5 önem düzeyi şartını sağlayan ve kuvvetli korelasyona sahip denklemin kullanımı tercih edilebilir.

Bu çalışmada kullanımı tercih edilecek en iyi alt kümeye sahip denklem, TSD, SÇD, Vp, Wa, n ve ρ_d ile temsil edilen bağımsız değişkenleri içermekte olup denklemin yüksek korelasyon katsayısına ($R^2= 0,917$) sahip olduğu bulunmuştur. Denklem Eşitlik 2'de verilmektedir.

$$\text{BAD} = 57.092 - 0.046\text{TSD} - 0.396\text{SÇD} - 1.719\text{Vp} + 3.071\text{Wa} - 2.288\text{n} - 6.286\rho_d \quad (2)$$

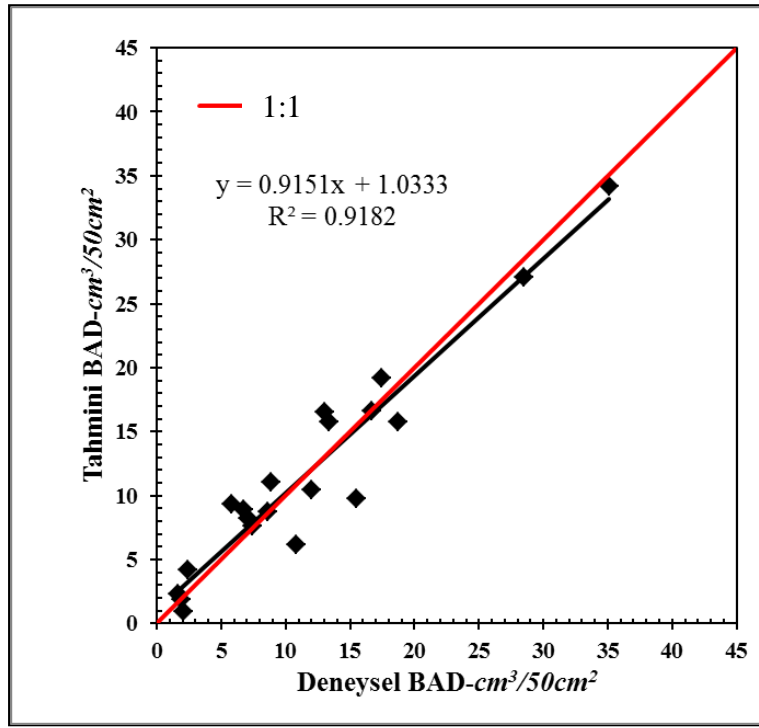
Tablo 4. Çoklu regresyon analizinden elde edilen en iyi alt kümeye ait denklemin istatistiksel sonuçları (Statistical results of the equation for the best subset obtained from multiple regression analysis)

	Standartlaşmamış Katsayılar		Standart Katsayılar	t	p
	β	Std. Hata	Beta		
Sabit Katsayı	57.092	25.379		2.250	0.042
TSD	-0.046	0.043	-0.266	-1.076	0.302
SÇD	-0.396	0.253	-0.490	-1.567	0.141
Vp	-1.719	1.021	-0.207	-1.683	0.116
Wa	3.071	0.966	2.021	3.180	0.007
n	-2.288	0.901	-2.276	-2.540	0.025
ρ_d	-6.286	10.205	-0.266	-0.616	0,549

Tablo 5. Çoklu regresyon analizinden geliştirilen denklemin regresyon modelinin varyans analizi (Variance analysis of the regression model of the equation developed from multiple regression analysis)

Model	Kareler Toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler Ortalaması	F	p
Regresyon	1332,567	6	222,094	24,062	0.000
Kalan	119,993	13	9,230		
Toplam	1452,560	19			

Çoklu regresyon yöntemiyle en yüksek belirleme katsayısı ve en uygun önem düzeyine sahip denklemin güvenilirliğini test edebilmek amacıyla deneysel ve tahmin edilen BAD değeri aynı grafik üzerinde incelenmiştir (Şekil 4). Deneysel ve tahmin edilen BAD değerleri arasındaki korelasyon katsayısının (R^2) 0,9182 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deneysel ve tahmin edilen BAD değerleri diyagramdaki 1:1 ($x=y$) doğrusu boyunca ve 1:1 doğrusunun alt ve üstünde yaklaşık yaklaşık eşit dağılım göstermiş olup bu durum uygulanan modelin güvenilirliğini göstermektedir.



Şekil 4. Deneysel ve tahmini BAD değerleri arasındaki ilişki (Relationship between experimental and predicted BAD values)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada Anadolu'nun farklı bölgelerinden derlenen tüf, andezit, granit, mermer, dolomit ve traverten gibi kayaç gruplarının Böhme aşınma ve fiziko-mekanik değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Doğal taşların fiziko-mekanik ve aşınma dirençleri arasında yapılan basit ve çoklu regresyon analizleri ile Böhme aşınma direnci değerinin farklı yöntemlerden elde edilen verilerle tahmini için denklemler türetilmiştir.

Çalışmada kullanılan Basit regresyon analiziyle Böhme aşınma direnci değerini tahmini için türetilen denklemlerden en iyi ilişkiyi logaritmik fonksiyonla Tek eksenli sıkışma dayanımı vermiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile Böhme aşınma dirençleri arasında negatif ilişki olup korelasyon katsayısı (R^2) 0,894 olarak belirlenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı testi tekrarlanma, örselenme, zaman, zahmet ve sadece laboratuvarda yapılabilmesi açısından dezavantaj oluşturmaktadır. SÇD ve V_p testleri ise tekrarlanabilmeleri, örselenmemeleri, hızlı, pratik ve hem arazide hem de laboratuvarda uygulanabilmeleri açısından daha avantajlıdır. Basit regresyon analizi ile belirlenen SÇD ve BAD değeri arasındaki en iyi ilişki negatif olup logaritmik fonksiyonludur ve korelasyon katsayısı (R^2) 0,846 dır. BAD ile V_p değerleri arasında en iyi ilişki polinomsal fonksiyonlu ve azalan yönde eğilim göstermekte olup korelasyon katsayısı (R^2) 0,774 olarak bulunmuştur. Doğal taşların ρ_d , n , W_a değerleri ile BAD değerleri arasında ise anlamlı ilişkiler bulunamamıştır.

Ayrıca birçok farklı değişkenden faydalanabilmek ve daha yüksek korelasyon katsayısı elde edebilmek için çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Çoklu regresyon analiziyle Böhme aşınma direnci ve fiziko-mekanik özellikler arasında türetilen denklemler arasında daha yüksek korelasyon katsayısı değerlerine ulaşılmış olup en yüksek korelasyon katsayısı (R^2) 0,917 olarak belirlenmiştir. Ayrıca çoklu regresyon analizi ile türetilen denklemlerden en yüksek korelasyon değeri veren denklemde kullanılan bağımsız değişkenler TSD, SÇD, V_p , ρ_d , n ve W_a ile temsil edilmektedir.

Böhme aşınma direncini tahmin etmek için farklı değişkenlerle geliştirilen denklemlerindeki verilerin alternatifli olması, verilerin elde edilme imkanları açısından seçenek oluşturarak, araştırmacıya tercih imkanı sağlayacaktır. Bu çalışmada geliştirilen istatistiksel modellerden elde edilen veriler, benzer fiziko-mekanik özelliklere sahip doğal taşların Böhme aşınma direnci değerini tahmin etmede güvenilir olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan kayaç türleri ve farklı kayaç türlerinin Böhme aşınma değerini tahmin etmek için farklı istatistiksel programlarla da yaygın olarak kullanılabilir denklemler geliştirilebilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Aksoy, H.S., 2018. Kireçtaşlarının Aşınma Dirençlerinin Endeks Özellikleri Yardımıyla Belirlenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 237-244.
- ASTM E494, 2010. Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 14 p.
- ASTM D5873, 2014. Standard test method for determination of rock hardness by rebound Hammer method. Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 6 p.
- Bozdağ, A., 2013. Tuz (NaCl) Kristallenmesinin Kayaçların Mühendislik Parametreleri Üzerine Etkisi. Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Çelik, S.B., Çobanoğlu, İ., Atatanır, L., 2014. General material properties of Denizli (SW Turkey) travertines as a building stone. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 825-838.
- Çelik, S.B., 2018. Karbonat Kayalarının Aşınma Dirençlerinin Geniş Disk Aşınma Deneyi ile Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30 (1), 303-310.
- Çobanoğlu, İ., Çelik S.B., 2010. Correlation between wide wheel abrasion (capon) and Bohme abrasion test results for some carbonate rocks, Scientific Research and Essays, 5 (22), 3398-3404.
- Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., 2017. Assessments on the usability of Wide Wheel (Capon) test as reference abrasion test method for building stones. Construction and Building Materials, 151, 319-330.
- EN 14157, 2004. Natural stones – Determination of abrasion resistance, European Committee for Standardization, Brussels, 19 p.
- EN 1926, 2006. Natural stone test methods – Determination of uniaxial compressive strength. European Committee for Standardization, Brussels, 20 p.
- EN 1936, 2006. Natural stone test methods- Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. European Committee for Standardization, Brussels, 11 p.
- EN 13755, 2008. Natural stone test methods. Determination of water absorption at atmospheric pressure European Committee for Standardization, Brussels, 12 p.
- Gökçe, M.V., 2014. The effects of bedding directions on abrasion resistance in travertine rocks. Turkish Journal of Earth Sciences, 24, 196-207.
- Göktan, R.M., Emir, E., 1996. Rockwell sertlik deneyinin mermerlerde sürtünme ile aşınma dayanımı kestirimi amacıyla kullanılabilirliği. Türkiye'de Mermer Yapı Dekorasyon, 46, 16-20.
- ISRM, 1979. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16,135-140.
- ISRM, 1978. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 89-97.
- İnce, İ., 2013. Donma Çözülme Döngüsünün Kayaçların Mühendislik Parametreleri Üzerine Etkisi, Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Kahraman, E., Kılıç A.M., 2017. Investigation of the Relationship between Böhme Abrasion Resistance and Strength Properties of Some Natural Stone. International Journal of Natural and Engineering Sciences, 11(2), 31-35.
- Kahraman, S., Günaydın O., 2007. Empirical methods to predict the abrasion resistance of rock aggregates. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 449-455.
- Kahraman, S., Fener, M., 2008. Electrical resistivity measurements to predict abrasion resistance of rock aggregates. Bulletin of Materials Science, 31(2), 179-184.
- Karaca Z., Deliormanlı A.H., Elci H., Pamukcu Ç., 2010. Effect of freeze-thaw process on the abrasion loss value of Stones. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 47, 1207-1211.
- Karaca, Z., Günes Yılmaz N., Goktan R.M., 2012. Considerations on the European Standard EN 14157 Test Methods: Abrasion Resistance of Natural Stones used for Flooring in Buildings. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(1), 103-111.
- MacGregor I.D., Chiu K.Y., 2000. Porosity and wear resistance in stone flooring tiles. Journal of Testing and Evaluation, 28, 149-154.
- Mohammed, A.A.A., 2018. Yapıtaşlarının Temel İndeks özellikleri ve Elastik Parametreleri ile Böhme Aşınma Kaybı indeksleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- NBG, 1985. Engineering Geology and Rock Engineering. Norwegian Group of Rock Mechanics, Fornebu, Norway, 249 p.
- Strzałkowski, P., Kaźmierczak, U., Wolny, M., 2020. Assessment of the method for abrasion resistance determination of sandstones on Böhme abrasion test apparatus. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01868-x>.
- TS EN 12407, 2002. Doğal taşlar- deney metotları- petrografik inceleme. Türk Standartları Enstitüsü yayınları, Ankara, 4 s.
- Ureel, S., Momayez, M., 2017. Simple Correlations between Rock Abrasion and Other significant Rock Properties for Rock Mass and Intact Quartzite. Open Journal of Civil Engineering, 7, 194-207.
- Yavuz, A.B., Turk, N., Koca, M.Y., 2005. Material properties of the Menderes massif marbles from SW Turkey. Engineering Geology, 82, 91-106.
- Yavuz, H., Uğur, İ., Demirdağ, S., 2008. Abrasion resistance of carbonate rocks used in dimension stone industry and correlations between abrasion and rock properties. Int Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, 260-267.



YALVAÇ-GELENDOST (ISPARTA) HAVZASI SU KAYNAKLARININ HİDROJEOKİMYASI VE KULLANILABİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ayşen DAVRAZ*, Burcu BATUR

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Yeraltısuyu, Hidrojeoloji, Hidrojeokimya, Su Kalitesi, Yalvaç-Gelendost.</i>	<p>Yalvaç-Gelendost havzası, Türkiye'nin ikinci büyük tatlı su gölü olan Eğirdir Gölü drenaj alanı içerisinde oldukça geniş bir alanı kapsamaktadır. Havzada hemen hemen bütün yerleşim alanlarında kaynak suları içme suyu amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada havzada özellikle içme suyu olarak kullanılan suların hidrojeokimyasal ve kalite özellikleri incelenmiştir. Havzada kaynak ve kuyu sularından Ekim-2019 döneminde yapılan analiz sonuçlarına göre Ca-Mg-HCO₃, Mg-Ca-HCO₃ ve Ca-HCO₃ su tipleri tespit edilmiştir. Ca ve HCO₃ iyonları baskın olup ve akifer ortamın alüvyon ile kireçtaşı ve kumtaşı gibi kayalar olabileceği tespit edilmiştir. Mg artışı dolomitik kireçtaşlarından oluşan Kurucaova formasyonu ve çakıltası, kumtaşı, kiltası ve marn birimlerinden oluşan Göksöğüt formasyonu ile ilişkilidir. İnceleme alanında suların majör iyon, azot türevleri (NO₂, NO₃, NH₄) ve ağır metal (As, B, Ba, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) içeriklerinin içme suyu limit değerleri içerisinde olduğu tespit edilmiştir. F elementi ise sadece bir örnekte limit değerlerin üzerindedir. Ayrıca, suların sulama suyu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için majör iyon içeriklerine bağlı farklı kimyasal oranlar ve grafikler kullanılmıştır. Bu parametrelere göre yeraltısularının sulama suyu olarak kullanıma uygun olduğu görülmüştür.</p>

HYDROGEOCHEMISTRY OF YALVAÇ-GELENDOST (ISPARTA) BASIN WATER RESOURCES AND DETERMINATION OF USABILITY PROPERTIES

Keywords	Abstract
<i>Groundwater, Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Water Quality, Yalvaç-Gelendost.</i>	<p>The Yalvaç-Gelendost basin covers a very large area within the drainage area of the Eğirdir Lake which is the second largest freshwater lake of Turkey. Spring waters are used for drinking water purposes in almost all residential areas in the basin. In this study, the hydrogeochemical and quality properties of the waters used especially as drinking water in the basin were investigated. According to the results of the analysis carried out in the basin from the spring and well waters in the period of October-2019, Ca-Mg-HCO₃, Mg-Ca-HCO₃ and Ca-HCO₃ water types were determined. Ca and HCO₃ ions are dominant and it has been determined that the aquifer environment may be rocks such as alluvium and limestone and sandstone. The increase in Mg is related to Kurucaova formation consisting of dolomitic limestones and Göksöğüt formation consisting of conglomerate, sandstone, claystone and marl units. In the study area, major ions, nitrogen derivatives (NO₂, NO₃, NH₄) and heavy metal (As, B, Ba, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) contents of the waters were found to be within drinking water limit values. The F element is above the limit values in only one example. In addition, different chemical ratios and graphics depending on the major ion contents were used to evaluate the usability of water as irrigation water. According to these parameters, it has been observed that groundwater is suitable for use as irrigation water.</p>

Alıntı / Cite

Davraz, A., Batur, B., (2020). Yalvaç-Gelendost (Isparta) Havzası Su Kaynaklarının Hidrojeokimyası ve Kullanılabilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1072-1085.

* İlgili yazar / Corresponding author: aysendavraz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1326

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Davraz, 0000-0003-2442-103X	Başvuru Tarihi / Submission Date	29.07.2020
B. Batur, 0000-0001-6261-5551	Revizyon Tarihi / Revision Date	23.09.2020
	Kabul Tarihi / Accepted Date	24.09.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Küreselleşmenin de etkisiyle değişen ve gelişen dünyada, geçmişten günümüze canlıların yaşamlarını idame ettirebilmesi için en önemli doğal kaynak olan su, günümüze kadar artan ihtiyaçla beraber çevresel ve antropojenik etkiler nedeniyle kullanım alanlarının kısıtlandığı, aynı zamanda kalitesi açısından olumsuz etkilendiği bir süreçtir.

Yeraltısularında doğal kökenli kirlilik, suların hidrolojik döngü sırasında etkileşim halinde oldukları kayaçların bileşimlerinde bulunan majör iyon (Na, Ca, K, Mg) ve iz (Ba, Fe, Cu, As, Ni, Cr, Al, F, vb.) elementlerle etkileşim içine girerek kimyasal ve fiziksel yapısında değişimlerin meydana gelmesidir. Bunların yanı sıra tarımda ilaçlama ve gübreleme, sanayi atıklarının arıtılmadan akarsulara verilmesi veya bu atıkların toprağa gömülmesi nedeniyle yağmur suları vasıtasıyla yeraltısularına karışması, enerji santralleri, çelik, kâğıt vb. büyük endüstriyel kuruluşların açığa çıkardığı zararlı maddeler hava yoluyla toprağa karışıp, oradan süzülerek yeraltısularına karışması, çöp depolama yerlerinin yanlış yerleşimi, evsel kirleticiler (deterjanlar vb.) gibi insan kaynaklı antropojenik nedenler de yeraltısularının dolaylı yollardan kirlenmesine yol açarak, kalitesini düşüren etmenlerdir.

Günümüzde yüzey ve yeraltı suları kıyaslandığında yüzey sularının yoğun kirleticilere daha kolay maruz kaldığı ve bu nedenle özellikle içme suyu olarak kullanımı açısından, nispeten daha az kirleticiye maruz kalmasından kaynaklı yeraltısularının kullanımının artması ve dolayısıyla önem kazanmasına neden olmuştur. İçme suyu amacıyla kullanılan kaynak suları, insan sağlığını tehdit edebilecek tüm doğal ve antropojenik kökenli kirleticilerden ve kirlenmeye sebep olabilecek etkenlerden korunmalı ve uygun şartlarda kullanıma sunulmalıdır. Günümüzde yapılan pek çok araştırmada yeraltısularının da farklı kirleticiler ile kirlendiği ve kullanılamaz durumda olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle mevcut durumda kullanımı bulunan bütün su kaynaklarının kalite değerlendirmelerinin yapılması özellikle insan sağlığı için büyük önem taşımaktadır.

Yalvaç-Gelendost havzası, Türkiye'nin güneybatısında Göller Bölgesi içerisinde bulunmaktadır. Havzada hemen hemen bütün yerleşim alanlarında kaynak suları içme suyu amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, kaynak sularının hidrojeokimyasal özellikleri, kalite ve sağlık risk değerlendirmelerinin yapılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada Yalvaç-Gelendost havzasının jeolojik, hidrojeolojik özellikleri ile havzada kullanılan kaynak sularının hidrojeokimyasal ve kalite özelliklerinin değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeolojisine yönelik çok sayıda yerli ve yabancı araştırmacılar tarafından yapılmış araştırmalar bulunmaktadır (Abdüsselamoğlu, 1958; Brunn vd., 1971; Dumond ve Kerey, 1975; Demirkol, 1977). Bu çalışmalarda, otoktan Torosları oluşturan yapıların yaşı ve Batı Toroslar'daki büyük nap sistemleri tartışılarak yapısal sorunlara açıklık getirilmeye çalışılmıştır. Havzanın doğusunda bulunan Sultandağlarında gözlenen şistler ve şistlerin arasında gözlenen kuvarsit ve kireçtaşı mercerklerinin bölgede temeli oluşturduğu belirtilmiştir (Abdüsselamoğlu, 1958). Yalçınkaya vd. (1986), Antalya, Beyşehir - Hoyran ve Likya naplarının Menderes Masifinin kuzeyindeki ofiyolitlerin, Üst Kretase- Üst Paleosen'de masifin güneyine, Üst Paleosen- Alt Eosen'de Anatolid Torid platformunun güneyine aktarılmasıyla oluştuğu, bunların aynı kökenli ofiyolitler olduğu ifade edilmiştir (Yalçınkaya vd., 1986). Alloktan birimler sıkışmayla otokton birimlerin üzerine yerleşmiş ve Beydağları doğusunda alçalma, batısında yükselme gerçekleşmiştir. Bu çekme-gerilmeleri sonucu birçok horst ve graben meydana gelmekle beraber günümüze kadar varlığını sürdüren göllerin çukurluğunu oluşturmaktadır. Yalvaç- Yarikkaya Neojen havzasında havzayı dolduran ve toplam kalınlığı 800 m'ye ulaşan Neojen istif Bağkonak, Madenli, Yarikkaya, Göksöğüt ve Kırkbaş formasyonu olarak 5'e ayrılmıştır (Yağmurlu, 1991). Havzadaki Neojen öncesi birimlerin Ofiyolit karmaşığı ve çoğunlukla Ordovisiyen yaşlı meta-sedimentitler ile Triyas- Kretase yaşlı karbonat kayalardan meydana gelmiş olduğunu ve dolayısıyla yoğun bir şekilde alüvyon ve gölsel tortullardan meydana geldiğini ifade edilmiştir (Yağmurlu, 1991).

İnceleme alanında hidrojeolojik amaçlı yapılan ilk çalışma DSİ 18. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada yeraltısuyu taşıyan birimler Mezozoyik - Neojen kireçtaşları, Pliyosen ve Kuvaterner kum- çakıllar olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, Hoyran, Gelendost ve Yalvaç ovaları için yeraltısuyu bilançosu hesaplanmıştır (Topçam vd., 1977). Havzada hidrojeoloji amaçlı yapılan en önemli araştırma Soysalan (2004) tarafından yapılan

doktora tezidir. Soyaslan (2004), bu çalışmasında Hoyran ve Yalvaç - Gelendost ovalarını ele alarak bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik özelliklerini incelemiştir. Bölgede gözlenen alüvyon birimin serbest akifer ve kireçtaşlarının karstik akifer özellik taşıdığını öne sürmüştür. Çalışma alanı hidrojeolojik olarak iki tali havzaya ayrılmış Yalvaç-Gelendost ovasında emniyetli kullanılacak yeraltısuyu miktarı $63.71 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ ve Hoyran ovasında $24.93 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak tespit etmiştir. Bu çalışmada MODFLOW üç boyutlu modüler sonlu farklar matematik modeli ile yeraltısuyu akım modellemesi yapılmıştır. Modelde 2000 yılına ait hidrolojik gözlem verileri ile yeraltısuyu boşalımının Eğirdir Gölü'ne doğru olduğu ve kireçtaşlarından yıllık $114 \times 10^6 \text{ m}^3$ beslenme olduğu hesaplanmıştır (Soyaslan, 2004).

Yalvaç-Gelendost havzasında çok sayıda yerleşim alanı bulunmaktadır. Bu alanlarda içme suyu olarak genelde kaynak suları kullanılmaktadır. Mevcut araştırma bölgede su kaynaklarının kalitesi ve kullanılabilirliğine yönelik yapılan ayrıntılı ilk araştırma olması açısından önem taşımaktadır.

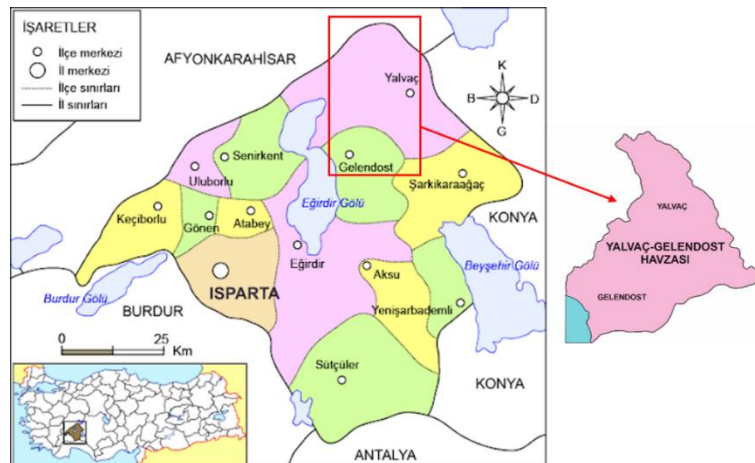
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

İnceleme alanı Isparta iline bağlı Yalvaç ve Gelendost ilçelerini kapsamaktadır (Şekil 1). Göller yöresinde bulunan Yalvaç - Gelendost havzası, Eğirdir Gölü kuzeydoğusunda 1165 km^2 lik alanı kapsamaktadır. Bölgede en önemli geçim kaynağı tarım ve hayvancılıktır. Havzaya düşen ortalama yağış miktarı 1970-2017 yılları arasında eş yağış eğrileri yöntemi ile 490 mm olarak belirlenmiştir (Batur, 2020). En sıcak aylar Temmuz ve Ağustos olup, Yalvaç ilçesinde ölçülen ortalama en yüksek sıcaklık değeri $22,9^\circ\text{C}$ 'dir. Çalışma alanının en önemli nehri Yalvaç deresidir. Havzadaki tüm dereler Eğirdir Gölü'ne ulaşmaktadır. Kaynaklar havzadaki en önemli içme suyu kaynaklarıdır. Bu çalışmada öncelikle, bölgede yüzeleyen jeolojik birimlerin litolojik özellikleri ve stratigrafik ilişkileri önceki araştırmalar dikkate alınarak irdelenmiştir. Bölgede yüzeleyen birimlerin hidrojeolojik özellikleri araştırılarak akifer birimler tanımlanmıştır.

3.2. Örneklemeye ve Analiz Yöntemi (Sampling and Analysis Method)

Bu çalışmada Ekim-2019'da içme suyu olarak kullanılan kaynak ve kuyu sularından su örnekleri alınmıştır. Su örneklerinin alımı sırasında suların hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH), toplam çözünmüş katı madde (TDS), sıcaklık (T) ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri Hanna (HI 991301) marka çok parametrelilik cihaz ile insitu ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Örneklemeye noktalarının konumu global konumlandırma sistemi (GPS) ekipmanı ile tespit edilmiştir. Yeraltısuyu örnekleri iki polietilen şişe kullanılarak alınmıştır. Katyon analizi için numuneler $\text{pH} < 2$ olana kadar %5'lik nitrit asit (HNO_3) ile koruma altına alınmıştır. Anyon analizi için örnekler asitleştirilmemiştir. Su örneklerinin majör anyon içerikleri (Cl , SO_4 , HCO_3) ve azot türevi analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma Laboratuvarında yaptırılmıştır. Major katyon (Na, Ca, Mg, K) ve iz element içerikleri Bureau Veritas (Acme-Kanada) Analitik Laboratuvar Hizmetleri Ltd. Şti. laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Suların hidrojeokimyasal özelliklerinin değerlendirilmesinde AquaChem 2014.2 yazılım programı kullanılmıştır. Suların içme suyu amacı için kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde 17/2/2005 tarihli ve 25730 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) standartlarından yararlanılmıştır. Ayrıca, suların sulama suyu amaçlı kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi amacı ile Wilcox (1955) ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı (Richards, 1954) diyagramları ile Permeabilite İndeksi (Doneen, 1964) gibi farklı parametreler açısından hesaplamalar yapılmış ve yorumlanmıştır.

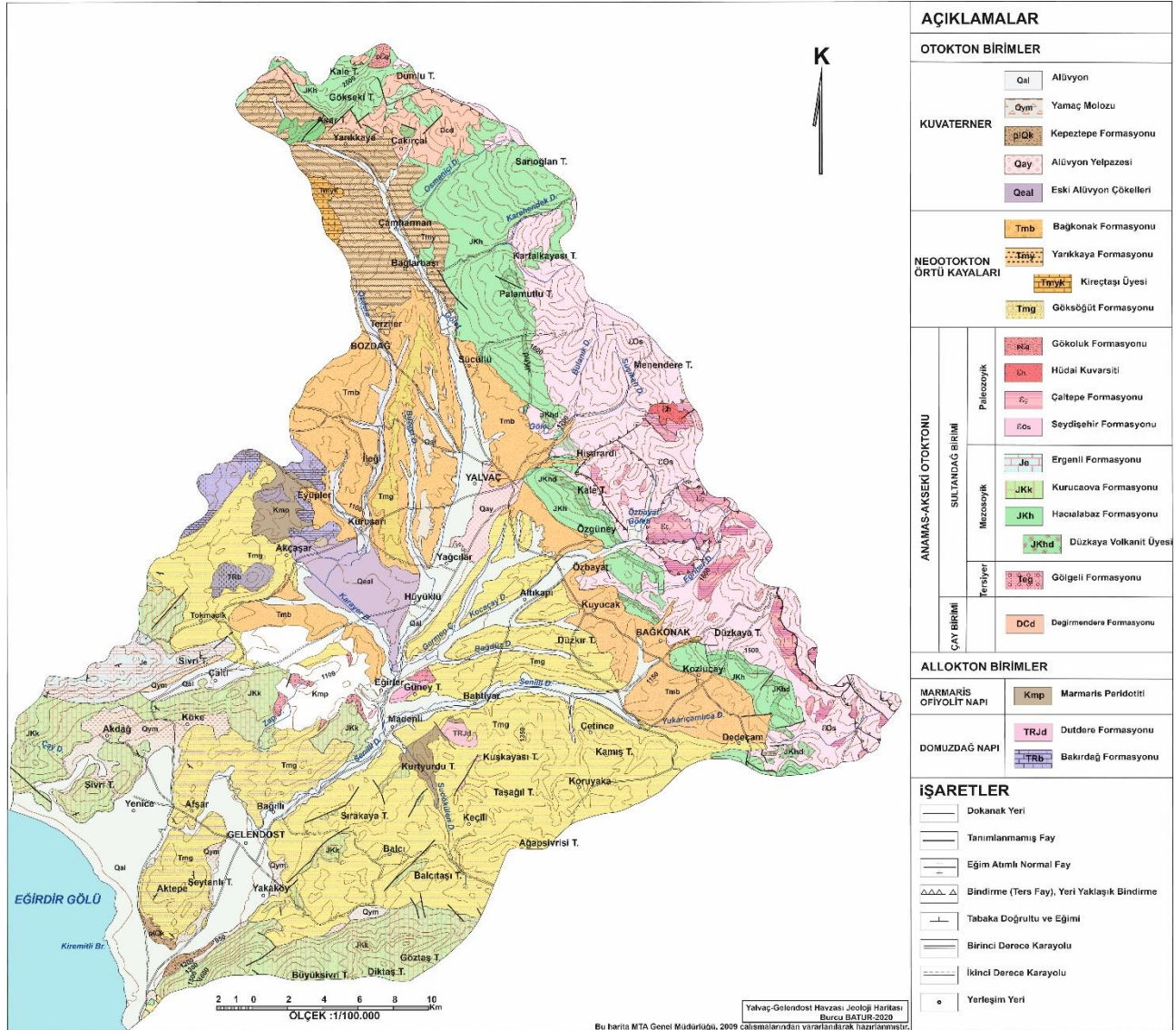


Şekil 1. İnceleme alanının yerbuldurma haritası (Location map of the study area)

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

4.1. İnceleme Alanının Jeolojisi (Geology of the Study Area)

İnceleme alanında Anamas-Akseki Otoktonu ve Beyşehir-Hoyran-Hadim naplarına ait birimler ile Neotokton örtü kayaları yüzylemektedir. Anamas-Akseki Otoktonu bölgede geniş alanlarda Sultandağ Birimi ve Çay Birimine ait formasyonlar ile temsil edilmektedir. Bölgede Sultandağ birimine ait Gökoluk formasyonu, Hüda Kuvarsiti, Çaltepe, Seydişehir, Ergenli, Kurucaova, Hacılabaz ve Gölge formasyonları gözlenmektedir. Çay birimine ait ise sadece Tersiyer yaşlı Değirmendere formasyonu yüzylemektedir. İnceleme alanında Beyşehir-Hoyran-Hadim napları Marmaris Ofiyolit napına ait Marmaris Peridotiti, Domuzdağ napına ait Dutdere ve Bakırdağ formasyonları ile temsil edilmektedir. Neotokton Örtü kayaları ise Bağkonak, Yarıkkaya, Göksögüt ve Kepeztepe formasyonları ile yamaç molozu ve alüvyondur (Balci, 2011; Umut, 2009). İnceleme alanının jeoloji haritası MTA tarafından yapılan Afyon-L25 (Balci, 2011) ve Afyon-L26 (Umut, 2009) paftaları baz alınarak hazırlanmıştır (Şekil 2; Şekil 3).



Şekil 2. İnceleme alanının genel jeoloji haritası (Geological map of the study area)

4.2. İnceleme Alanının Hidrojeolojisi (Hydrogeology of the Study Area)

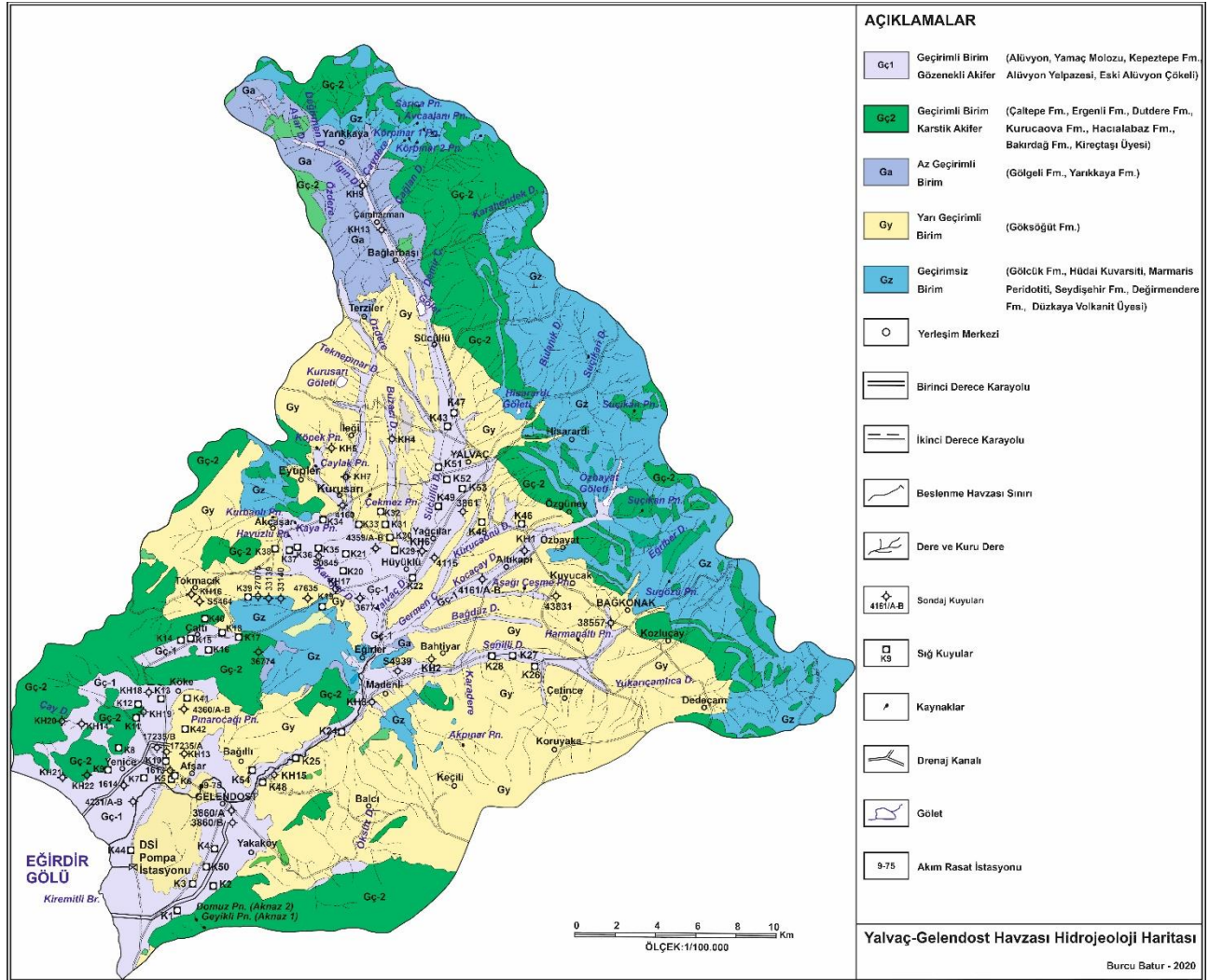
İnceleme alanında bulunan jeolojik birimler hidrojeolojik özellikleri dikkate alınarak yeniden değerlendirilmiş ve hidrojeoloji haritası hazırlanmıştır. Alanda yüzeyleyen litolojik birimler; suyu taşıma ve iletme özelliklerine göre geçirimli, yarı geçirimli, az geçirimli ve geçirimsiz birimler olmak üzere ayrılmış ve haritalanmıştır. İnceleme alanında yüzeyleyen hidrostratigrafik birimler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Şekil 4).

Üst Sistem	Sistem		Formasyon	Bölge	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
	Sistem	Seri				
SENOZOYİK	KUVATERNER	PLİYO-KUVATERNER	Alınyon Yamaç M. Formasyonu	pIQk		Gevşek tutturulmuş, tutturulmamış kil, kum, çakıl
			Alınyon Y. Formasyonu			UYUMSUZLUK
	MIYOSEN	ÜST	Göksöğüt Formasyonu	Tmg		Kumtaşı, kilitaşı, marn, killi kireçtaşı, vb.
			Yarıkkaya Formasyonu	Tmyk		GEÇİŞLİ
	ORTA	Bağkonak Formasyonu	Peridotitli Marmaris Formasyonu	Tmb		Kireçtaşı, marn
			Peridotitli Marmaris Formasyonu	Tmyk		GEÇİŞLİ
	JURA	ORTA	Dutdere Formasyonu	Tr-Jd		Kırmızı renkli çakiltası, kumtaşı
			Dutdere Formasyonu	Tr-Jd		UYUMSUZLUK
	TRİYAS	ORTA-ÜST	Bakırdağ Formasyonu	Trb		Neritik kireçtaşı
			Bakırdağ Formasyonu	Trb		TEKTONİK
KRETASE	MARMARİS PERİDOTİTLİ	Marmaris Peridotitli Formasyonu	Kmp		Kireçtaşı, dolomit	
		Marmaris Peridotitli Formasyonu	Kmp		TEKTONİK	
DEVONİYEN KARBONİFER	DEĞİRMENDERE	Değirmendere Formasyonu	DCd		Harzburgit, dunit, serpantin, vb.	
		Değirmendere Formasyonu	DCd		TEKTONİK	
SENOZOYİK	PALEOJEN	Göğeli Formasyonu	Teg		Sleyt, şist, dolomit, kuvarsit, rekristalize kireçtaşı	
		Göğeli Formasyonu	Teg		TEKTONİK	
MESOZOYİK	KRETASE	ÜST	Göğeli Formasyonu	Teg		Konglomera, kumtaşı, vb.
						UYUMSUZLUK
	JURA	MALM	Ergenli Formasyonu	Je		JKk- Neritik kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit
						UYUMSUZLUK
	JURA	DOĞGER	Hacıalabaz Formasyonu	JKh		Je- Ooliti, algli kireçtaşı, dolomit
						JKhd- Düzkaya üyesi; Spilit, bazalt, diorite
	ORTA LİYAS	KURUCAOVA	Kurucuaova Formasyonu	JKk		JKk- kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı
						UYUMSUZLUK
	ORDOVİSİYEN	ALT	Seydişehir Formasyonu	EOs		Şist, kuvarsit, dolomit, metakumtaşı, metaşeyli, metaçakiltası, yumrulu-rekristalize kireçtaşı
						GEÇİŞLİ
KAMBRIYEN	ORTA	Çalpepe Formasyonu	Çç		Rekristalize kireçtaşı, yumrulu kireçtaşı, dolomit	
					GEÇİŞLİ	
PREKAMBRIYEN	ALT	Hüddai Kuvarsiti	Şh		Kuvarsit	
					GEÇİŞLİ	
GÖKOLUK FORMASYONU	ALT	Gökoluk Formasyonu	pŞg		Şist, kuvarsit, kayrak	
					GEÇİŞLİ	

Şekil 3. İnceleme alanı stratigrafik kolon kesiti-ölçeksizdir (Stratigraphic column section of the study area - no scale)

4.2.1. Geçirimli Birim-Gözenekli akifer (Permeable Unit- Porous aquifer)

Benzer litolojilerden oluşan alüvyon, alüvyon yelpazesi, eski alüvyon çökelleri, yamaç molozu ve Kepeztepe formasyonu geçirimli birim olarak adlandırılmıştır. Bu birimler Eğirdir Gölü kıyısında, Gelendost ve Yalvaç ova düzlüklerinde ve dere yataklarında gözlenmektedir. İnceleme alanında alüvyon birim içerisinde açılmış çok sayıda kuyu bulunmaktadır. Bu kuyularda çakıl ve kum seviyelerinden yeraltısuyu alınmaktadır. Bölgesel olarak (Akçaşar, Tokmacık, Yalvaç güneyi) kalın kil seviyelerine rastlanmaktadır. İnceleme alanında alüvyon önemli miktarda yeraltısuyu potansiyeline sahip gözenekli akifer özelliği taşımaktadır ve inceleme alanında en önemli akiferdir (Batur, 2020).



Şekil 4. İnceleme alanının hidrojeoloji haritası (Hydrogeological map of the study area)

4.2.2. Geçirimli Birim-Karstik akifer (Permeable Unit- Karstic aquifer)

İnceleme alanında kireçtaşlarından oluşan Çaltepe, Ergenli, Kurucaova, Hacialabaz, Dutedere ve Bakırdağ formasyonları ile Yarıkkaya formasyonunun kireçtaşı üyesi aynı grup içerisinde ele alınmıştır. Kireçtaşları kırık, çatlak ve erime boşluklu yapılarından dolayı karstik akifer özelliği taşımaktadır. İnceleme alanında Gelendost Ovası ve Tokmacık, Çaltı ve Akçaşar köyleri civarında alüvyon tabanında bulunan kireçtaşlarından yeraltısuyu alınmaktadır. Soyaslan (2004) tarafından yapılan doktora tezinde kireçtaşı akiferinden Eğirdir Gölü'ne yeraltısuyu boşalımı olduğu belirtilmiştir. İnceleme alanında kireçtaşları önemli yeraltısuyu potansiyeline sahip karstik akifer özelliği taşımaktadır.

4.2.3. Yarı Geçirimli Birim (Semipermeable Unit)

Yalvaç, Gelendost ilçeleri ve çevresinde geniş alanlarda yüzeyleyen Göksöğüt ve Bağkonak formasyonları Yarı Geçirimli Birim olarak adlandırılmıştır. İnceleme alanında kumtaşı, kıltaşı, marn, killi kireçtaşı ile gözenekli travertenimsi kireçtaşı litolojilerinden oluşan Göksöğüt formasyonu ile çakıltaşı ve kumtaşı birimlerinden oluşan

Bağkonak formasyonlarından boşalan çok sayıda kaynak bulunmaktadır. Formasyonlar içerisindeki kumtaşı ve kireçtaşı seviyeleri bol kırık çatlaklı ve ikincil gözenekliliğe sahiptir. Çakıltaşları erime boşlukludur. Bu seviyeler yer yer kaynak boşalmaları oluşturmuştur. Formasyonlar içerisindeki kiltası, marn ve çamurtaşı seviyeleri ise birimlerin akifer olma kapasitesini kısıtlamaktadır.

4.2.4. Az Geçirimli Birim (Slight-permeable Unit)

İnceleme alanında Gelendost ilçesi kuzeyinde küçük alanlarda görülen Gölge formasyonu ile Yalvaç ilçesi kuzeybatısında yüzeyleyen Yarikkaya formasyonları Az Geçirimli birim olarak adlandırılmıştır. Gölge formasyonu kumtaşı, kiltası, silttaşı ve marnlardan, Yarikkaya formasyonu ise kiltası, çamurtaşı, marn ve yersel çakıltaşından oluşmaktadır. Formasyonlar içerisindeki marn, kiltası, çamurtaşı ve silttaşı seviyeleri birimlerin su depolama ve iletme özelliğini azaltmaktadır. Kumtaşı ve çakıltaşı seviyelerinde ise kırık-çatlak durumları, kalınlık ve yayılımları oranında bir miktar yeraltısuyu bulunabilmektedir. İnceleme alanında bu birimlerden boşalan kaynak suyu bulunmamaktadır.

4.2.5. Geçirimsiz Birim (Impermeable Unit)

İnceleme alanında benzer hidrojeolojik özellikler taşıyan Gökölük, Seydişehir ve Değirmendere formasyonları ile Hüda kuvarsiti, Marmaris peridotiti ve Düzkaya volkanit üyesi geçirimsiz birim olarak değerlendirilmiştir. Seydişehir formasyonu ve Gökölük formasyonu içerisindeki rekristalize kireçtaşı ve mermer seviyeleri az miktarda yeraltısuyu içerebilmektedir. Ancak, birimlerin metamorfizma geçirmesi geçirimsiz özellik taşımalarına neden olmaktadır. İnceleme alanının doğusunda bulunan kaynakların çoğunluğu Hacılabaz formasyonu-Seydişehir formasyonu dokanağından boşalmaktadır. Bu kaynak çıkış bölgelerinde Seydişehir formasyonu karstik kireçtaşının altında geçirimsiz tabanı oluşturmaktadır. Peridotit ve kuvarsit seviyeleri de kırıklı-çatlaklarında bir miktar yeraltısuyu bulundurmaktadır. Ancak, bölgede bu birimlerin yayılımları ve kırık-çatlak seviyeleri düşük olduğundan geçirimsiz birim olarak kabul edilmiştir.

4.2.6. Su noktaları (Water points)

İnceleme alanında alüvyon ortamda açılmış çok sayıda sığ ve keson kuyu bulunmaktadır. Sığ kuyuların derinlikleri 5-15 m arasındadır. Bu kuyularda ölçülen yeraltısuyu seviyesi 1-11m arasında değişmektedir (Soyaslan, 2004). Yalvaç ovasında yer alan sondaj kuyuların derinlikleri 14-199.5 m, yeraltısuyu derinlikleri 1.0- 21.60 m, debileri ise 1- 20 l/s civarındadır. Gelendost ovasında bulunan sondaj kuyuların derinlikleri 21-225 m, yeraltısuyu derinlikleri 0.15- 51.2 m, debileri ise 0.2- 63.2 l/s civarındadır (Soyaslan, 2004). Gelendost güneyinde açılan en derin kuyu 197.5 m olup kuyuda tamamen alüvyon birim kesilmiştir. Gelendost kuzeybatısı ve batısında açılan kuyularda alüvyon tabanında kireçtaşı birimine girilmiştir. Yalvaç çevresinde açılan kuyularda ise alüvyon tabanında kireçtaşı, marn, serpantin, ofiyolit ve konglomera birimleri gözlenmektedir (Batur, 2020).

İnceleme alanında çok sayıda kaynak boşalmalarına rastlanmaktadır. Bu kaynaklardan en önemlisi Yalvaç ilçesi içme suyu ihtiyacının karşılandığı Yalvaç Suçikan kaynağıdır. Kaynak, Yalvaç ilçesinin kuzeydoğusunda Seydişehir formasyonunda Çaltepe formasyonu ve bindirme düzlemi ile ilişkili olarak boşalmaktadır. (Batur, 2020). Kaynağın debisi yaklaşık olarak 70-85 l/s arasındadır (Soyaslan, 2004). Yalvaç ilçesi kuzeyinde kurulmuş olan Pisidia antik kentinin su ihtiyacı, Suçikan pınarından alınan suyun yaklaşık olarak 10 km uzunluğundaki su yolu kullanılarak kente getirilmesi ile karşılanmıştır. Bu su yolunun kalıntıları Pisidia antik kentinde gözlenmektedir. Bölgedeki diğer önemli kaynak ise Bağkonak köyünün kuzeydoğusunda yer alan Sugözü kaynağıdır. Kaynak Seydişehir ve Hacılabaz formasyonları dokanağından boşalmaktadır. Sürekli akışa sahip olan kaynağın debisi 50-73 l/s olarak tespit edilmiştir (Soyaslan, 2004). Özbayat Suçikan kaynağı, Özbayat köyü doğusunda, Seydişehir ve Çaltepe formasyonu dokanağından boşalmaktadır. Kaynak suları Özbayat ve Özgüney köylerinin içme suyu ihtiyacının karşılanması için kullanılmaktadır. İnceleme alanında Hacılabaz kireçtaşı, Göksöğüt, Kurucaova ve Bağkonak formasyonlarından boşalan çok sayıda kaynak bulunmaktadır.

4.3. Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özellikleri (Hydrogeochemical Properties of Water Resources)

Bu çalışma kapsamında Ekim-2019 döneminde su örnekleri alınmıştır. Su örneklerinin majör iyon içerikleri Tablo 1'de verilmiştir. İnceleme alanında su kaynaklarının pH değeri 7.59-8.89 arasında olup "Bazik karakterli" olarak tanımlanmıştır. Kaynak sularının EC değeri 230-420 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kuyu sularının 310-660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. İnceleme alanında yeraltısularının sertliği kaynak sularında 11.51-27.15 Fr^0 , kuyu sularında ise 12.7-17.6 Fr^0 olarak hesaplanmıştır. Sular sertlik derecesine göre Yumuşak- Az sert arasında sınıflandırılmaktadır.

Tablo 1. Yeraltısularının hidrojeokimyasal özellikleri (Hydrogeochemical properties of groundwater)

Örnek No	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁼ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Sertlik Fr°	EC μ S/cm	pH	T °C	TDS	Su Sınıfı
YG-1*	3.35	0.90	54.32	19.99	6.74	6.40	262.3	21.77	320	8.01	12.8	160	Ca-Mg-HCO ₃
YG-2*	1.65	2.02	61.34	20.68	1.30	4.93	323.3	23.81	380	8.11	16.7	190	Ca-Mg-HCO ₃
YG-3*	3.14	0.72	44.96	17.29	2.23	6.92	244	18.33	310	7.86	17.6	150	Ca-Mg-HCO ₃
YG-4	2.37	1.20	46.36	28.86	1.71	7.25	305	23.42	350	7.91	13.4	160	Mg-Ca-HCO ₃
YG-5	2.95	0.34	44.95	10.75	4.83	4.98	231.8	15.64	280	7.59	14.1	140	Ca-Mg-HCO ₃
YG-6	4.92	0.54	48.13	18.49	1.89	24.51	292.8	19.61	340	7.93	12.8	160	Ca-Mg-HCO ₃
YG-7	2.01	0.22	28.83	14.57	0.64	23.80	158.6	13.18	240	8.60	12.7	120	Ca-Mg-HCO ₃
YG-8	1.49	0.24	24.56	13.10	0.80	3.11	183	11.51	290	8.89	13	100	Ca-Mg-HCO ₃
YG-9	1.90	0.23	29.29	14.43	0.84	3.32	158.6	13.24	230	8.73	12.6	110	Ca-Mg-HCO ₃
YG-10*	16.42	1.04	124.50	20.72	27.20	40.63	445.3	39.58	660	8.01	15.7	330	Ca-HCO ₃
YG-11*	27.85	1.76	90.94	23.61	23.46	31.60	414.8	32.40	600	7.91	15.1	300	Ca-Mg-HCO ₃
YG-12*	10.15	0.67	48.33	42.16	7.46	23.35	353.8	29.39	520	8.69	12.7	260	Mg-Ca-HCO ₃
YG-13	3.67	1.44	99.34	5.76	2.60	3.32	335.5	27.15	420	8.27	15.7	210	Ca-HCO ₃
YG-14	11.64	1.48	37.25	26.56	5.47	5.81	292.8	20.21	360	8.88	19.6	180	Mg-Ca-HCO ₃
YG-15	3.71	0.78	58.66	16.54	2.29	7.53	286.7	21.44	340	8.53	17.5	170	Ca-Mg-HCO ₃

*Kuyudan alınan örnekleri göstermektedir

4.3.1. Major iyon içerikleri (Major ion contents)

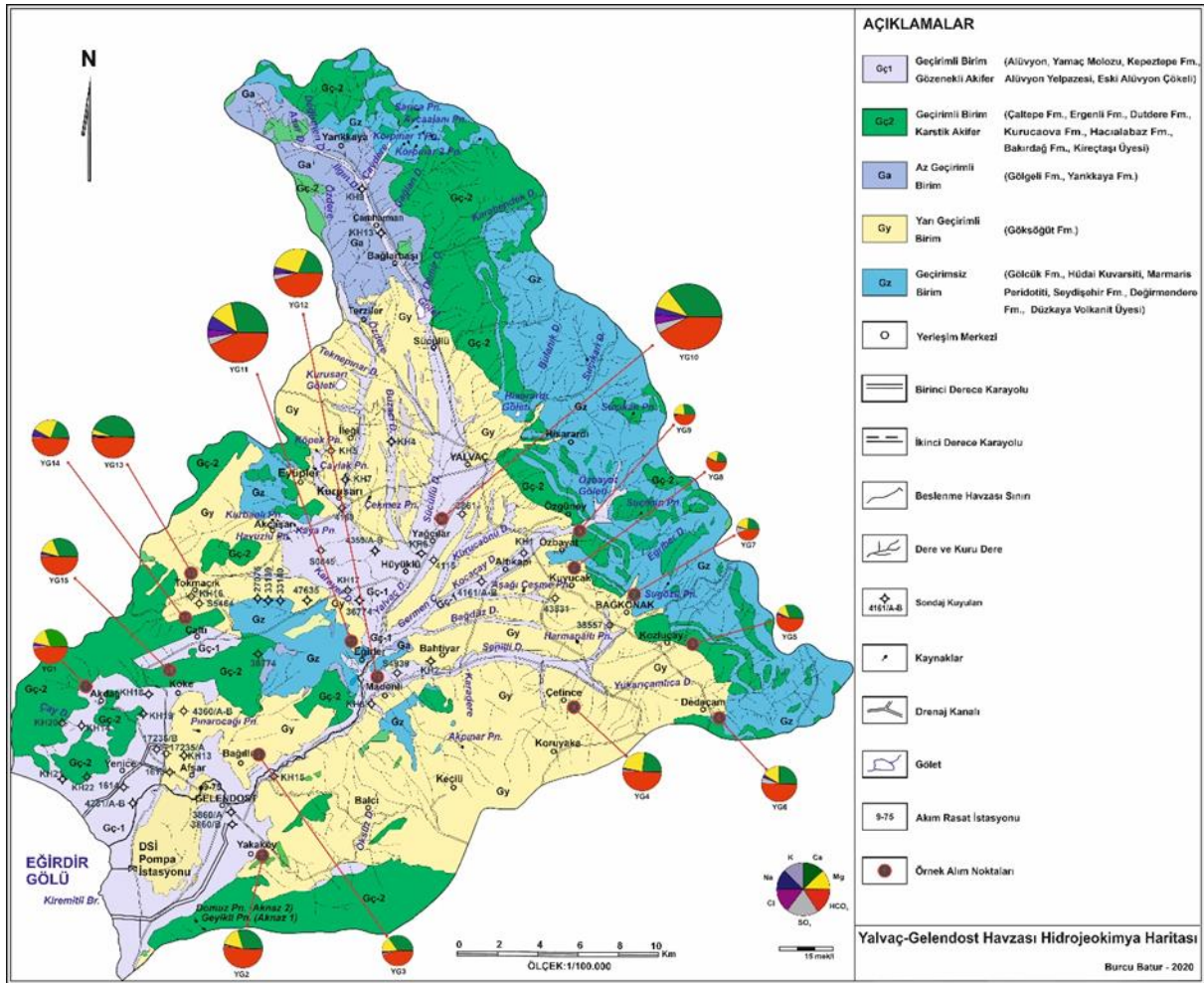
Su örneklerinin majör iyon içerikleri kullanılarak hazırlanan dairesel diyagramlar ile hidrojeokimya haritası oluşturulmuştur (Şekil 5). İnceleme alanında kaynak ve kuyu sularından alınan örneklerin sodyum içerikleri 1.49 – 27.85 mg/l arasında değişmekte olup yüksek sodyum içerikleri kuyu sularından elde edilmiştir (Tablo 1). Kuyu sularındaki Na artışı Göksöğüt ve Bağkonak formasyonları ile ilişkilidir.

Su örneklerinin Ca içerikleri kaynak sularında 24.56-99.34 mg/l, kuyu sularında ise 44.96-124.50 mg/l değerleri arasında değişmektedir (Tablo 1). Kuyu sularındaki kalsiyum artışı dolaşım süresinin uzunluğuna bağlı olarak artmaktadır. Suların Mg içerikleri kaynak sularında 5.76-28.86 mg/l, kuyu sularında ise 17.29-42.16 mg/l değerleri arasındadır. K değerleri ise 0.22-2.22 mg/l arasındadır. İnceleme alanındaki yeraltısularında CO₃ içeriği tespit edilememiştir. Baskın iyon HCO₃'dür. Bölgede kaynak ve kuyu sularının HCO₃ içeriği 158.6-445.3 mg/l arasında değişmektedir. Kuyu suları kaynak sularına göre daha yüksek HCO₃ içeriğine sahiptir.

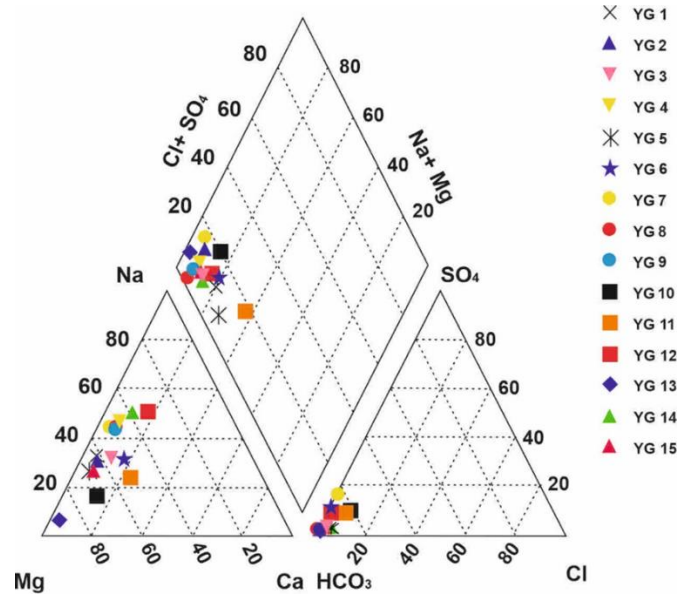
İnceleme alanında su örneklerine ait 9 parametre için korelasyon analizi Aquachem 2014.2 programı kullanılarak yapılmıştır (Tablo2). Su örneklerinin Elektriksel iletkenlik (EC- μ S/cm) değeri ile Ca, K ve HCO₃ içerikleri arasında güçlü pozitif korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, HCO₃ ile Ca ve K iyonları arasında güçlü pozitif korelasyon, Na-Cl iyonları arasında güçlü pozitif korelasyon bulunmaktadır. HCO₃ ve K iyonları arasındaki güçlü pozitif korelasyon, suların kimyasal yapısını denetleyen unsurların silikat ayrışması ile ilişkili olduğunun göstermektedir. HCO₃ ve Ca iyonları arasındaki güçlü pozitif korelasyon ise karbonat çözünürlüğü ile ilişkilidir. Ca ile Na, K ve Cl iyonları arasında ve Mg-SO₄ arasında orta düzeyde korelasyon bulunmaktadır. Bu durum iyonik mobilizasyon sırasında benzer kaynak ve/veya jeokimyasal davranışı yansıtmaktadır. Na ile HCO₃ ve SO₄ arasında yine orta seviyede korelasyon bulunmaktadır. (Batur, 2020).

Tablo 2. Major iyonların Spearman Rank korelasyon analizi (Spearman Rank correlation analysis of major ions)

	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄
pH	1	-0.106	-0.456	-0.09	-0.18	-0.220	-0.214	-0.288	-0.356
EC		1	0.732	0.617	0.696	0.774	0.988	0.687	0.427
Ca			1	0.212	0.503	0.665	0.756	0.610	0.350
Mg				1	0.490	0.482	0.614	0.411	0.563
Na					1	0.415	0.688	0.862	0.661
K						1	0.754	0.479	0.083
HCO ₃							1	0.686	0.454
Cl								1	0.44
SO ₄									1



Şekil 5. Hidrojeokimya haritası (Hydrogeochemistry map)



Hidrolojik sistemlerde su çözeltilerinin kimyasal karakteri, su bileşimlerinin tanımlanabilir kategorilere göre uygun alt bölümlere ayrılmasını sağlayan ve kayalar içindeki mineraller ve yeraltı suyu arasında meydana gelen kimyasal süreçlerin etkilerini yansıtan hidrojeokimyasal fasiyes kavramı ile belirlenebilmektedir (Back, 1966). Suların hidrojeokimyasal fasiyeslerinin belirlenmesinde yaygın olarak Piper diyagramı kullanılmaktadır. Piper diyagramına göre, inceleme alanındaki bütün kuyu ve kaynak suyu örnekleri genel olarak benzer yapıya sahiptir. Bu örnekler alkali toprak elementlerinin (Ca+Mg), alkali elementlere (Na+K) göre daha fazla olduğu, zayıf asit köklerinin (CO_3+HCO_3) güçlü asit köklerinden (SO_4+Cl) fazla olduğu, karbonat sertliği %50'den fazla olan suları

temsil etmektedir. İnceleme alanında yeraltısularının büyük bir çoğunluğu Ca-Mg-HCO₃'lü sular fasiyesinde olduğu görülmektedir (Şekil 6). YG4, YG12 ve YG14 nolu örnekler Mg-Ca-HCO₃'lü su sınıfında, YG10 ve YG13 nolu örnekler Ca-HCO₃'lü sular sınıfındadır. Madenli (YG12) ve Çaltı (YG14) örneklerindeki Mg artışı dolomitik kireçtaşlarından oluşan Kurucaova formasyonu ile kaya-su etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Çetince (YG4) kaynak suyundaki Mg artışı ise çakıltı, kumtaşı, kıltaşı ve marn birimlerinden oluşan Göksöğüt formasyonu ile ilişkilidir.

4.3.2. Azot türevleri (Nitrogen derivatives)

Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan başlıca kirletici olan azot yeraltısuyunda çoğunlukla nitrat (NO₃) şeklinde bulunur. Azot sularında amonyum (NH₄), nitrit (NO₂), azot (N₂), azot oksit (N₂O) çözülmüş azot ve organik azot şeklinde de bulunabilmektedir (Uslu ve Türkman, 1987). Yeraltısuyunda nitratin başlıca kaynağı tarımsal faaliyetler olup magmatik ve tortul kayalardan da nitrat gelebilir. Sularında 5-10 mg/l'nin üzerinde NO₃ varlığı suyun antropojenik kökenli kirleticiler tarafından kirletildiğini göstermektedir. İçme suyu standartlarına göre (TS266, 2005; WHO, 2006, 2011) 50 mg/l NO₃ için limit değer olarak verilmiştir. İnceleme alanında yeraltısuyu örneklerinin nitrat içerikleri 0.73-40.63 mg/l arasında olup sınır değeri aşmamaktadır. Suların nitrit içerikleri <0.01 mg/l, amonyum içerikleri ise <0.06 mg/l olarak belirlenmiştir (Tablo 2).

4.3.4. İz elementler (Trace elements)

Ağır metaller, geçiş elementleri veya iz elementler doğal sularında izlenen üçüncül elementlerdir. Bu elementler kaya-su etkileşimine bağlı olarak veya atıklar, tarımsal faaliyetler gibi antropojenik etkenlerle yeraltısularında bulunurlar. Ağır metallerin yüksek içerikleri içme suyu olarak kullanımda önemli sağlık problemlerinde neden olabilmektedir. Bu nedenle içme suyu standartlarında ağır metaller için limit değerler önerilmiştir. Bu çalışmada su örneklerinin bazı ağır metal içerikleri Tablo 2'de verilmiştir. İnceleme alanında yeraltısularının As konsantrasyonu 1.9-6.9 µg/l arasında değişmektedir. İnceleme alanında As artışının kaynak suları için kaya-su etkileşimi, kuyu suları için ise tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Su örneklerinin B içerikleri 5-43 µg/l arasında, Ba içerikleri 18.7-490.97 µg/l arasında, Cr içerikleri 0.6-6.3 µg/l arasında, Cu içerikleri 0.3-12.3 µg/l arasında, Mn içerikleri <0.05-4.96 µg/l arasında, Pb içerikleri <0.02-0.9 µg/l arasında ve Zn içerikleri 0.7-27.9 µg/l arasında değişmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. İnceleme alanında yeraltısularının ağır metal, azot türevleri ve F analiz sonuçları (Heavy metal, nitrogen derivatives and F analysis results of groundwater in the study area)

Örnek No	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l	NH ₄ mg/l	F mg/l	As µg/l	B µg/l	Ba µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Mn µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l
YG-1*	3.86	0.01	0.06	0.07	6.9	10	50.7	2	12.3	2.03	0.9	27.9
YG-2*	4.95	0.01	0.06	0.2	4.7	8	225.06	0.8	4.4	<0.05	0.3	5.4
YG-3*	2.61	0.01	0.06	0.08	5.1	13	84.11	1	3.9	<0.05	0.6	7.4
YG-4	5.13	0.01	0.06	0.17	6.9	11	177.37	0.6	0.5	1.72	<0.02	1
YG-5	2.1	0.01	0.06	0.03	6.9	5	154.3	0.7	0.7	0.5	<0.02	1.3
YG-6	0.73	0.01	0.06	0.09	4.0	11	50.41	0.7	0.5	4.96	<0.02	0.9
YG-7	1.36	0.01	0.06	0.02	4.2	5	59.62	0.7	0.3	0.22	<0.02	0.7
YG-8	2.37	0.01	0.06	0.03	3	5	18.7	0.7	2.2	<0.05	<0.02	7.8
YG-9	2.21	0.01	0.06	0.02	1.9	5	33.45	0.7	1.7	<0.05	<0.02	2.2
YG-10*	41.3	0.01	0.06	3.5	4.3	34	185.75	1.3	3	0.13	0.3	7.7
YG-11*	6.93	0.01	0.06	0.63	6.8	35	208.72	1.7	3.8	0.33	<0.02	4
YG-12*	8.65	0.01	0.06	0.4	2.7	43	85.99	6.3	2	0.31	<0.02	4.7
YG-13	14.14	0.01	0.06	0.02	3.2	5	490.97	0.9	8	0.32	0.4	11.9
YG-14	7.32	0.01	0.06	0.09	5.1	43	280.12	3.3	10.8	0.32	0.4	17.2
YG-15	5.53	0.01	0.06	0.01	5.7	5	94.3	1.9	3.9	0.08	0.4	5.2
TS266, 2005	50	0.50	0.50	1.5	10	1000		50	2000	50	10	--
WHO, 2006, 2011	50	3	--	1.5	10	2400	700	50	2000	50	10	5000

*Kuyudan alınan örnekleri göstermektedir.

4.4. Suların Kullanılabilirlik ve Kalite Özellikleri (Usability and Quality Properties of Waters)

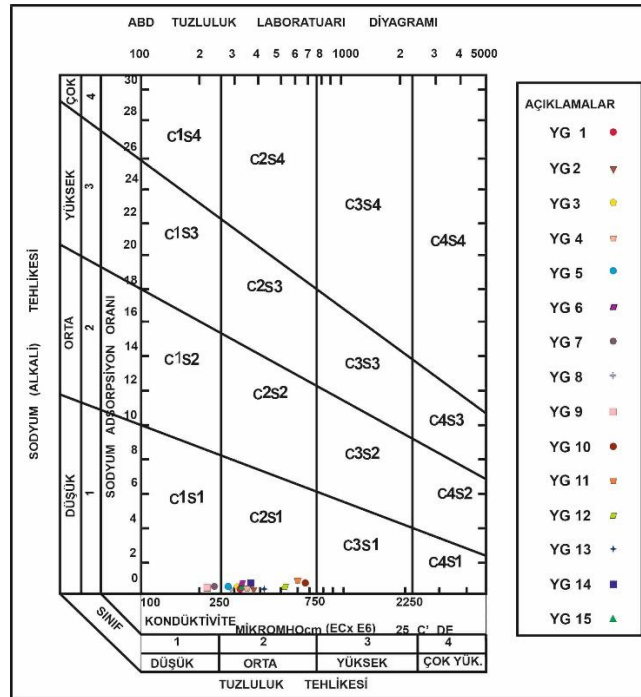
İnceleme alanındaki suların içme suyu olarak değerlendirilmesinde elde edilen kimyasal parametreler öncelikle Türkiye İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmeliği (TS266, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2006,

2011) standartları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 1, 2). Bu değerlendirmelere göre, havzada kaynak ve kuyu sularından alınan örneklerin genel olarak fiziksel özellikleri, anyon-kasyon, azot türevleri ve ağır metal içeriklerinin TS266 (2005) ve WHO (2006, 2011) sınır değerleri aşmadığı görülmektedir. Ancak, özellikle As elementi için yapılan araştırmalarda sınır değere yakın As içeriğine sahip suların uzun süreli kullanımı ile ilgili sağlık problemlerinin oluşabileceğine ilişkin veriler elde edilmiştir (Nichols vd., 1998; Wang ve Mulligan, 2006; Wu, vd., 2009).

TS266 (2005) ve WHO (2011) içme suyu standartlarında F için verilen limit değer 1.50 mg/l'dir. İnceleme alanındaki yeraltısularında F içeriği 0.01-3.5 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 2). F için içme suyu limit değeri Yağcılar köyünden alınan kuyu suyu (YG10) örneğinde aşılmıştır. Bu kuyuda alüvyon ve Göksöğüt formasyonu kesilmiştir. Kuyudaki F artışı Göksöğüt formasyonunu oluşturan kumtaşları ile ilişkili olabilir. Ayrıca, tarımsal faaliyet kaynaklı antropojenik etkenler de söz konusudur. İçme suyu ile yüksek oranda F almı dış florozu, iskelet florozu, bağların kalsifikasyonu, dişlerin benekenmesi ve kemiklerin deformasyonu gibi sağlık problemleri yaratabilir (WHO 2011; Narsimha ve Rajitha, 2018).

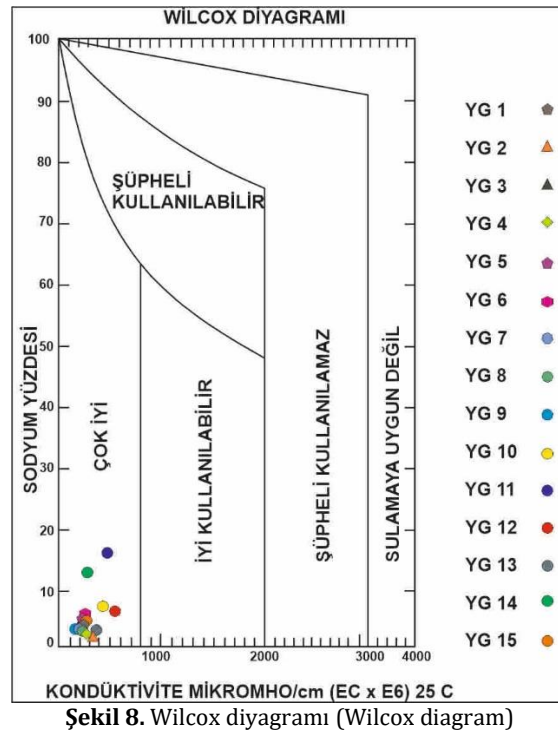
İnceleme alanında yeraltısularının sulama suyu amaçlı kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde ABD Tuzluluk Laboratuvarı ve Wilcox diyagramları ile Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na), Artıksal Sodyum Karbonat (RSC), Geçirgenlik İndeksi (PI), Magnezyum Tehlikesi (MT) ve Kelly Oranı (KR) değerleri kullanılmıştır.

Suların sulama suyu kullanılabilirliği için genel olarak kullanılan diyagramlardan biri ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramıdır. İnceleme alanından alınan su örnekleri ABD tuzluluk diyagramına göre YG-7 ve YG-9 nolu örnekleri hariç 'C₂S₁' (az sodyumlu ve orta tuzlulukta sular) sınıfında yer almaktadır (Şekil 7). YG-7 ve YG-9 nolu örnekleri 'C₁S₁' (az sodyumlu ve az tuzlu sular) sınıfındadır. Havzadan alınan su örnekleri Wilcox diyagramına göre "çok iyi kullanılabilir sular" sınıfında yer almaktadır (Şekil 8).



Şekil 7. ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı (U.S. Salinity Laboratory Diagram)

Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR), sulama suyu olarak kullanım için yararlanılan önemli ölçütlerden biridir. İnceleme alanında yeraltısularının SAR değeri 0.05-0.67 arasında değişmektedir (Tablo 3, 4) ve 'çok iyi özellikte sulama suyu' sınıfındadır. Sodyumun fazlalığı toprağın yapısını bozarak geçirgenliğini azaltır ve toprak yüzeyinde sert bir tabaka oluşmasına neden olur. Sodyum fazlalığı bitkiler için de zehirli bir ortam oluşturur. İnceleme alanında % Na değeri 1.47-15.65 arasında değişmektedir (Tablo 3). Sularda Na artışı kil mineralleri ile ilişkilidir.



Şekil 8. Wilcox diyagramı (Wilcox diagram)

Toprak infiltrasyon oranı sorununun tahmini için kullanılan parametrelerden biri Artıksal (Kalıcı) Sodyum Karbonat (RSC) (Eaton, 1950; Richards, 1954) değeridir. Negatif (-) RSC değeri, ortamda sodyum zararı oluşabilme olasılığının olmadığı şeklinde tanımlanmaktadır. İnceleme alanında YG1, YG7, YG9, YG10 ve YG12 örnekleri dışında tüm örneklerin RSC değerleri pozitifdir. Bu durumda inceleme alanında yeraltı sularında sodyum zararı oluşturabilecek potansiyel CO_3 ve HCO_3 iyonu varlığını göstermektedir. Ayrıca, RSC değerine göre yapılan sınıflamada ise sular yeraltı suları “çok iyi kaliteye sahip I. Sınıflar” sınıfındadır (Tablo 3; Tablo 4). Geçirgenlik indisi (PI) değeri sulama suyu değerlendirmesi için önemli bir parametredir. İnceleme alanında suların PI değerleri % 39.77-75.88 arasında değişmektedir Geçirgenlik indeksi değerine göre yeraltı suları genel olarak II. sınıf suları temsil etmekte ve iyi sulama sularıdır (Tablo 3; Tablo 4). İnceleme alanında yeraltı sularının Magnezyum Tehlikesi (MT) değerleri %21.52 ile 50.64 arasında değişmektedir (Tablo 3). MT değeri YG12 ve YG14 örneklerinde 50’den büyüktür. Bu örnekler dışındaki bütün su örnekleri MT değeri açısından sulama suyu olarak kullanıma elverişlidir (Tablo 4). Kelly oranı (KR) Kelley (1963) tarafından sulama suyu değerlendirilmesi için önerilmiştir. İnceleme alanında suların KR değerleri 0.02-0.19 arasında olup sulama suyu için uygundur (Tablo 3, 4).

Tablo 3. Sulama suyu sınıflamasında kullanılan parametreler (Parameters used in irrigation water classification)

Örnek No	SAR	%Na	RCS	PI	MT	KR
YG-1*	0.10	3.22	-0.06	49.31	37.75	0.03
YG-2*	0.05	1.47	0.54	49.11	35.72	0.02
YG-3*	0.10	3.57	0.33	56.19	38.79	0.04
YG-4	0.07	2.14	0.31	48.83	50.64	0.02
YG-5	0.10	3.93	0.67	63.81	28.27	0.04
YG-6	0.15	5.15	0.88	58.13	38.77	0.05
YG-7	0.08	3.20	-0.04	62.39	45.44	0.03
YG-8	0.06	2.73	0.70	75.88	46.78	0.03
YG-9	0.07	3.02	-0.05	62.06	44.81	0.03
YG-10*	0.36	8.25	-0.62	39.57	21.52	0.09
YG-11*	0.67	15.65	0.32	49.65	29.97	0.19
YG-12*	0.26	6.96	-0.08	45.08	58.98	0.08
YG-13	0.10	2.84	0.07	44.80	8.72	0.03
YG-14	0.36	11.03	0.76	59.28	54.02	0.13
YG-15	0.11	3.61	0.41	52.35	31.73	0.04

Tablo 4. Sulama suyu sınıflamasında kullanılan parametreler (Parameters used in irrigation water classification)

Parametre	Sembol	Birim	Kaynaklar	Formül	Oranlar	Su sınıfı
Sodyum Adsorpsiyon Oranı	SAR	mek/l	Todd, 1980 Richards, 1954	$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa+rMg}{2}}}$	<10 10- 18 18- 26 > 26	Çok iyi özellikte sulama suları İyi özellikte sulama suları Orta özellikte sulama suları Kötü özellikte sulama suları
Sodyum Yüzdesi	% Na	mek/l	Wilcox, 1955	$\%Na = 100 * \left(\frac{rNa}{rNa + rCa + rMg + rK} \right)$	0-20 20-40 40-60 60-80 >80	Mükemmel İyi İzin verilebilir Şüpheli Uygun değil
Artıksal sodyum karbonat	RSC	mek/l	Eaton, 1950 Richards, 1954 Raghunath, 1987	$RSC = (rCO_3 + rHCO_3) - (rCa + rMg)$	< 1.25 1.25-2.5 > 2.5	Çok iyi-I. Sınıf su İyi-II. Sınıf su Kullanılabilir-III. Sınıf su
Geçirgenlik indeksi	PI	mek/l	Doneen, 1964 Raghunath, 1987	$PI = 100 * \frac{rNa + r\sqrt{HCO_3}}{r(Na + rCa + rMg)}$	>%25 %25-75 <%75	I. sınıf II. sınıf III. sınıf
Magnezyum Tehlikesi	MT	mek/l	Raghunath, 1987	$MT = 100 * \left(\frac{rMg}{rMg + rCa} \right)$	<50 >50	Uygun Uygun değil
Kelly oranı	KR	mek/l	Kelly, 1963	$KR = \frac{rNa}{rCa + rMg}$	<1 1-2	Uygun Uygun değil

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

İnceleme alanında Anamas-Akseki Otoktonu ve Beyşehir-Hoyran-Hadim naplarına ait birimler ile Neotokton örtü kayaları yüzeylenmektedir. İnceleme alanında bulunan litolojik birimler; suyu taşıma ve iletme özelliklerine göre geçirimli, yarı geçirimli, az geçirimli ve geçirimsiz birimler olarak ayırtlanmıştır. Önemli akifer birimler alüvyon, kireçtaşı ve Miyosen-Pliyosen birimlere ait kumtaşı ve çakıltası seviyeleridir. İnceleme alanında yeraltısularının büyük bir çoğunluğu Ca-Mg-HCO₃'lü sular fasiyesinde olduğu görülmektedir. Bazı su örnekleri ise Mg-Ca-HCO₃ ve Ca-HCO₃ su sınıfındadır. Yeraltısularında Ca ve HCO₃ iyonları baskın olup akifer ortam olarak alüvyon, kireçtaşı ve kumtaşı gibi kayaların etkin olduğu söylenebilir. Mg artışı dolomitik kireçtaşlarından oluşan Kurucaova formasyonu ve çakıltası, kumtaşı, kiltası ve marn birimlerinden oluşan Göksöğüt formasyonu ile ilişkilidir.

İçme suyu olarak kullanımın değerlendirilmesi için suların kimyasal özellikleri İnsani Tüketim Amaçlı Sular Yönetmeliği Türk İçme Suyu (TS266, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2006, 2011) standartları ile karşılaştırılmış ve bütün su örneklerinin genel olarak fiziksel özellikleri ile anyon-kasyon içeriklerinin sınır değerleri aşmadığı tespit edilmiştir. İnceleme alanında yeraltısuyunun kirlilik analizleri de değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler için azot türevleri ve ağır metal analizleri yapılmıştır. Örneklerinin nitrat içerikleri 0.73-40.63 mg/l arasında olup sınır değeri aşmamaktadır. Suların nitrit içerikleri <0.01 mg/l, amonyum içerikleri ise <0.06 mg/l olarak belirlenmiştir ve limit değerler içerisindedir. İnceleme alanında suların As, B, Ba, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn ve F içerikleri analiz edilmiştir. F elementi için YG-10 örneği dışında bütün su örneklerinin ağır metal ve F içeriklerinin TS266 (2005) ve WHO (2006, 2011) içme suyu standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir.

İnceleme alanında yeraltısularının sulama suyu amaçlı kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde ABD Tuzluluk Laboratuvarı ve Wilcox diyagramları ile sodyum adsorpsiyon oranı (SAR), sodyum yüzdesi (%Na), Artıksal sodyum karbonat (RSC), Geçirgenlik indeksi (PI), Magnezyum Tehlikesi (MT) ve Kelly oranı (KR) parametreleri kullanılmıştır. ABD tuzluluk diyagramına göre 2 örnek hariç 'C₂S₁' sınıfında yer almaktadır. YG-7 ve YG-9 nolu örnekler ise 'C₁S₁' sınıfındadır. Wilcox diyagramına göre ise 'çok iyi kullanılabilir sular' sınıfındadır. Diğer parametrelere göre de bölgede suların sulama suyu olarak kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2019-7043 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Abdüsselamoğlu, Ş., 1958. Sultandağı'nın 1/100.000 ölçekli jeolojik leveleri hakkında rapor: M.T.A. Gen. Müd. Derleme Rapor

No. 2669.

- Back, W., 1966. Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain, 498-A, 1-42.
- Balçı, V., 2011. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Afyon-L25 Paftası, No:162, Ankara.
- Batur, B., 2020. Yalvaç-Gelendost (Isparta) Havzası Su Kaynaklarının Hidrojeokimyası Ve Sağlık Risk Değerlendirmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131 s., Isparta (yayımlanmamış).
- Brunn, J.H., Dumont, J.F., Graciansky, P.C., Gutnic, M., Juteau, T., Marcoux, J., Monod, O.ve Poisson, A., 1971. Outline of the Geology of the Western Taurids Campbell, A.S., ed., Geology and History of Turkey, Pet. Expl. Soc. Libya, Tripoli, 225-255.
- Demirkol, C., 1977. Yalvaç-Akşehir Dolayının Jeolojisi: Doçentlik Tezi, SÜ. Fen. Fak. 114 s., (yayımlanmamış).
- Doneen, L.D., 1964. Water Quality for Agriculture. Department of Irrigation, University of California, Davis, 48.
- Dumont, J.F., Kerey, E., 1975. Eğirdir Gölü Güneyinin Temel Jeolojik Etüdü, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 18, 169-175.
- Eaton, F.M., 1950. Significance of Carbonate in Irrigation Water. Soil Science, 69(2), 123-133.
- Kelley, W.P., 1963. Use of Saline Irrigation Water Soil Science, 95(4), 355-391.
- Narsimha, A., Rajithac, S., 2018. Spatial distribution and seasonal variation in fluoride enrichment in groundwater and its associated human health risk assessment in Telangana State, South India. Human and Ecological Risk Assessment, 24(8), 2119-2132
- Nichols, T.A., J. S. Morris, M. M. Mason, V. L. Spate, C. K. Baskett, T. P. Cheng, C. J. Tharp, J. A. Scott, T. L. Horsman, J. W. Colbert, A. E. Rawson, M. R. Karagas and V. Stannard. 1998. The study of human nails as an intake monitor for arsenic using neutron activation analysis. Journ. Radioanalytical & Nuclear Chemistry. 236 (1-2): 51-57.
- Ragunath, H.M., 1987. Groundwater. New Delhi: Wiley.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkaline Soils, US Department of Agriculture, HandBook 60 (160).
- Soyaslan, İ., 2004, Eğirdir Gölü Doğusunun Hidrojeoloji İncelemesi ve Yeraltısu Modellemesi. SDÜ Fen Bil. Enst., Doktora tezi, 210 s., Isparta (yayımlanmamış).
- Todd, D.K., 1980. Groundwater Hydrology (2nd Edition) John Wiley & Sons pp 535.
- Topçam, A., vd., 1977. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısu Dairesi Başkanlığı, Hoyran-Gelendost ve Yalvaç Ovaları Hidrojeolojik Etüd Raporu, DSİ, İşletme Müdürlüğü Matbaası, 56 s., Ankara.
- TS266, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular. Türk İçme Suyu Standartları TS 266 sayılı standart -Türk Standartları Enstitüsü – Ankara.
- Umut, M., 2009. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Afyon-L26 Paftası, No:119, Ankara.
- Uslu, O., Türkman, A., 1987. Su Kirliliği ve Kontrolü. T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınlar Eğitim Dizisi, Ankara, 364s.
- Wang, S., Mulligan, C., 2006. Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior and distribution. Science of the Total Environment, 366, 701-721.
- WHO, 2006. Guidelines for drinking-water quality. 3rd edition incorporating 1st and 2nd addenda, World Health Organization.
- WHO, 2011. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed., World Health Organization, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, ISBN 978 92 4 154815 1.
- Wilcox, L.V. 1955. Classification and use of irrigation waters, USDA Circular No. 969, p 19.
- Wu, B., Zhao, D., Jia, H., Zhang, Y., Zhang, X., Cheng, S., 2009. Preliminary Risk Assessment of Trace Metal Pollution in Surface Water from Yangtze River in Nanjing Section, China, Bull. Environ. Contam. Toxicol. 82, 405-409.
- Yalçınkaya, S., Ergin, A., Afşar, Ö. P., Dalkılıç, H., Taner, K. ve Özgönül, E., 1986. Batı Torosların Jeoloji Raporu, MTA Rapor No: 7898, 131 s.
- Yağmurlu, F.,1991. Yalvaç-Yarıkkaya Neojen Havzasının Stratigrafisi ve Depolama Ortamları, Türkiye Jeoloji Bülteni, 34, 9-19.



TAMİR SÜRECİNİ İÇEREN GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİ İÇİN YENİ BİR ENVANTER MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Ramazan EROĞLU¹, Erdal AYDEMİR^{2*}

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Geri Dönüşüm,
Envanter Modeli,
Kusurlu Üretim,
Tamir Süreci.*

Öz

Bu çalışmada, geri dönüşüm süreci, kusursuz hale getirilmek için toplanan ürünlerin tamamının ya geri dönüşerek ya da kısmi geri dönüşerek işlendiği ve kalan kısmın ise tamir edildikten sonra geri dönüşüme verilmesi durumunu gösteren bir envanter modeli geliştirilmiştir. Önerilen model geri dönüşüm envanter modelinin tamir durumunu ele alan bir modelidir. Model örnek bir uygulama problemi ile desteklenerek çözümlenmiştir. Ayrıca talep, marjinal geri alım oranı ve kullanım oranı birim zamanda toplam maliyet gibi matematiksel maliyetleri ve çevrim sürelerinin değişim sonuçları için üç faktör üç seviye olacak şekilde bir tam faktöriyel L27 deney tasarımı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sonuçta geri dönüşüm ve tamir sürecinde marketlerden geri alınan ürünler hiç atık olmayacak şekilde ya geri dönüşüyor ya da tamir edildiği görünmektedir. Sonraki araştırma konusu olarak; geri dönüşüm envanter modelleri için araştırmacılar ve endüstri uygulamacıları için araştırma boşlukları ve fırsatları gösterilmiştir.

A NEW INVENTORY MODEL TO RECOVERY PROCESS WITH REWORK

Keywords

*Recovery Process,
Inventory Model,
Imperfect Production,
Rework.*

Abstract

A new inventory model has been developed for the reworked case that some of the products involved in the re-production process may be defective during the recovery process of the collected products on the recovery process in this paper. The proposed model has a reworked case of recycling inventory and it is supported by a numerical problem. In addition, a full factorial L27 test design was performed with three levels for three factors for a total cost per unit time, change in recycling and reproduction by batch size for marginal buyback rate, utilization rate and recycling good quality product ratio values with the different levels of demand. As a result, the effects of some defect of re-production processes in the recycling process have been shown with the proposed inventory model. In addition, research gaps and opportunities for researchers and industry practitioners for recycling inventory models are shown as further research of the model.

Alıntı / Cite

Eroğlu, R., Aydemir, E., (2020). Tamir Sürecini İçeren Geri Dönüşüm Süreci İçin Yeni Bir Envanter Modeli Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1086-1098.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

R. Eroğlu, 0000-0001-5262-2707
E. Aydemir, 0000-0003-4834-725X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	01.08.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.11.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	28.11.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda önemi giderek artan geri dönüşüm ve uygulamaları; kullanılan materyallerin toplanması, belirli bir süreçten geçirilmesi, yeniden üretilmesi ve yeniden kullanılması işlemlerinin tümü olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde geri dönüşüm; atıkların yeni bir materyal olarak kullanılması için sistematik olarak toplanıp sınıflandırılmasını ve istenilmeyen maddelerden temizlenmesini kapsamaktadır. Başka bir ifadeyle; atıkların

* İlgili yazar / Corresponding author: erdalaydemir@sdu.edu.tr, +90-246-211-1453

yeniden kullanım sürecinde fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerden geçirilerek yoluyla ikincil hammaddeye dönüştürülmesi ve tekrar üretim sürecine dahil edilmesi şeklinde tanımlanabilir (Eroğlu, 2019). Kullanılmış ürünlerin geri dönüştürülme işlemi çoğu kez bertaraf edilmesinden daha ekonomik olabilmekte ve işletmeciler tarafından daha çekici olabilmektedir. Metal hurdalar, atık kağıt ve depozitolu meşrubat şişeleri geri dönüşümün tipik örnekleridir ve uzun zamandan beri geri dönüşümde varlığını sürdürmektedir. Yeniden kullanılabilir ambalaj ve elektronik hurda geri dönüşümü ise sıklıkla karşılaşılan daha yeni örneklerdir. Ayrıca çevresel kaygıların artması ürünlerin yeniden kullanımına olan önemin giderek artmasını sağlamaktadır (Fleischmann et al., 1997). Kullanılmış ürünlerin veya atıkların toplanması yeniden kullanımı son yıllarda önemi ekonomik açıdan artmıştır. Yani kullanılan ürünlerin geri kazanılması, çevreyi ve doğayı koruması endüstriyel anlamda ve akademik araştırmalarda ilgiyi artırmıştır (Pishchulov vd., 2014). Geri dönüşüm sanayi ürünlerinde tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel maliyetlerin, toplam üretim maliyetlerinin içerisinde de önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca ekonominin gelişmesiyle birlikte, küresel iklim ısınmasının hızlanması ve kaynak sıkıntısı gibi sanayileşme ile birlikte çevresel ve kaynak sorunu ortaya çıkmaktadır (Saber, 2018). Geri dönüşüm endüstrisi; birçok alan ve sektörü içine alan ve ekonomik, çevresel ve sosyal farkındalık sağlayan devasa bir sektördür. Sektörün içinde birçok toplanacak malzeme ve işlenecek ürün portföyüne sahiptir. Ürünler toplama, parçalama ve ayırma daha sonrada geri dönüştürme gibi evreleri vardır (Akçalı ve Çetinkaya, 2011). Geri dönüşüm kullanılmış ürünlerin kullanım sürelerini artırdığı için atık ürünlerin azalmasına ve doğal kaynakların ve çevrenin korunmasını amaçlar. (Jaber ve El Saadany, 2009). Sonuç olarak; geri dönüşüm materyallerini girdi olarak kullanmak, başka girdi materyalleri için oluşabilecek kıtlık durumlarının oluşmasını azaltacaktır (Lafforgue ve Rouge, 2019). Diğer yandan, atıkların geri dönüştürülmesi enerji tasarrufu ve geri dönüşüm materyalleri depolama alanlarını azaltarak doğanın korunmasına etki etmekle birlikte çevresel sorunları en aza indirgemiş olunur (Mawandiya vd., 2017). Çevresel durumları en az şekilde etkilenmekle birlikte ekonomik açıdan da fayda sağlamaktadır. Örnek verilecek olursa, geri dönüşümden üretilen "yeni gibi" ürünün maliyeti çoğu zaman sıfırdan üretilen ürünün maliyetinden %30-50 oranında daha düşük fiyatlıdır ve bu sebeple geri dönüşüm toplam maliyeti sıfırdan üretilen ürünün toplam maliyetinden daha azdır (Giri ve Sharma, 2016). Geri dönüşüm sürecinde öne çıkan firmaların başında Dell, General Motors, Hewlett-Packard (HP), IBM, Kodak ve Xerox gibi öncü firmalar yer almaktadır (Akçalı ve Çetinkaya, 2011). Yeniden üretim sürecindeki aşamalar altı bölümden oluşmaktadır. Bu aşmalar toplama, ayırma, parçalama-sökme, stok kontrol, değerlendirme ve yeni ürünü ekonomiye kazandırma seklindedir. Yeniden üretilen ürünler ne amaçla ve yöntemle geri dönüştürülecek olursa olsun, geri dönüşüm materyallerin düzenli ve ekonomik olacak şekilde belirli toplama ünitelerine gönderilmesi gerekir (Eroğlu, 2019). Geri dönüşüm sayesinde birçok alanda hem tasarrufa hem de çevresel kaygıların azaldığı görülmektedir. Bunun somut örneklerinden söz edecek olursak 31 milyon ton atık toplanmasıyla birlikte 42 milyon ağaç tasarrufu, 585 milyon kg daha az sera gazı salınımı 69 milyon m³ daha az su kullanımı, 20 milyar KWh daha az enerji tasarrufu ve 13 milyar TL kazanç elde edilebilmektedir (Internet-1, 2018).

Bu çalışmada hem geri dönüşümde hem de tamirden geri dönüşüme aktarılırken kurtarma seçeneği olarak "tamir yoluyla yeni" ürünlere odaklanılmaktadır. İncelenen duruma göre; tedarikçi bir ürün için sabit talep belirlenir ve talep karşılanır. Daha sonra kullanılmış ürünler müşterilerden tekrardan toplanır. Talebi karşılamak için üç alternatif kullanılır; bunlar üretim, geri dönüşüm ve tamirdir. Tamir edilen kısım tekrardan geri dönüşüm ünitesine gelerek işlem görmesiyle "tamir yoluyla yeni" ürün envanteri elde edilmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde kusurlu ürünler, yeniden işleme ve geri dönüşüm sürecinde detaylı kaynak araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde tamir durumunu içeren önerilen envanter modelinin elde edilışı anlatılmıştır. Daha sonra örnek test problemi üzerinde hesaplamalı sonuçlar verilmiş ve parametrelerin farklı durumları için duyarlılık analizi çalışması yapılmıştır. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen çıkarımlar ve gelecek araştırma konularına yer verilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Son zamanlarda üretim miktarlarının çoğalması ve yeşil üretimin gerek kaynaklar gerekse çevre korunmasında yeni bir aşama ortaya sunulmuştur. Geliştirilen envanter modelinde çevreci (yeşil) üretim benimsenmiş ve önemsenmiştir. Bu aşamada geri dönüşüm önemli bir yere sahiptir ve özellikle tedarik zinciri yönetimi bu süreçte kapalı- döngü yaklaşımıyla birden fazla yeni model ile desteklendiği bilimsel yazında etkili bir yere sahiptir (Aydemir, 2015). Bu sebeple çalışmanın konusu ile ilgili olan ve örtüşen kusurlu ürünler, kalite kontrol, yeniden işleme ve geri dönüşüm modellerini kapsayan bilimsel yazın örnekleri özetlenmiştir.

2.1. Kusurlu Ürünler Süreci (Imperfect Production)

Rosenblatt ve Lee (1986) üretim sürecinde bir miktar kusurlu ürün çıkması durumunu içeren optimal üretim çevrimi süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca hem doğrusal, üstel hem de çok durumlu bozulma süreçleri incelenmiştir. Kim ve Hong (1999) ise, Rosenblatt ve Lee (1986) modelinde olduğu gibi kusurlu ürünleri

incelerken geçen sürenin rassal dağılıma benzediğini kabul ederek genişletmiştir. Chung ve Hou (2003) çalışmasında ise stoksuzluğa izin vererek kusurlu ürünlerin üretim sistemi içinde en uygun çalışma belirleyen bir model geliştirmişlerdir. Salameh ve Jaber (2000) çalışmasında alınan veya üretilen ürünlerin kusursuz olmadığı bir envanter modelini benimsemişlerdir ve bu çalışma, ilgi duruma stoksuzluk genişletmesi yapan ilk çalışmadır. Eroğlu ve Özdemir (2007) çalışmasında ise sipariş edilen her partinin kusurlu ürünler içeren bir EÜM modeli geliştirmiştir. Sana (2010), çalışmasında ise rastgele zamanlarda kontrol altı durumundan kontrol dışı durumuna geçileceği kusurlu üretim sisteminden bir EÜM araştırması yapmıştır. Wee vd. (2013) çalışmasında, eksiklik ve tarama kısıtlaması olan kusurlu ürünler için ekonomik üretim miktarı (EÜM) modeli ve çözüm prosedürü geliştirmektedir. Rezaei (2016) tarafından yapılan çalışma, ekonomik sipariş miktarı (ESM) modellerine örnekleme planlama ve denetleme durumları koyarak genişletmiştir. De Giovanni (2019) çalışmasında Sananın modelini geliştirerek ürün arızalarının olumsuz etkisini göz önünde bulunduran optimal kontrol modeli oluşturmuştur. Sanjai ve Periyasamy (2019) çalışmaları ise; planlı bir envanter modelinde tek bir ürünle beraber ürün tek aşamada üretilmektedir ve üretim sistemi kusurlu ürünler içerir. Khara vd. (2020) tarafından yapılan çalışma ise, iki tip üretim vardır. Bir hammaddeden üretilen ürün ikincisi kullanılmış mamul üründen yeniden üretilmiş ürün döngüsü içerisinde yeniden işlenen bazı ürünler kusurlu olma durumlarını ele almaktadır.

2.2. Yeniden İşleme Süreci (Rework Process)

EÜM ve ESM modellerinde tamir (yeniden işleme) süreçleri incelendiği zaman optimal üretim miktarı ve yeniden işlenebilir ürün miktarına karar vermeye çalışan ilk model Schrady (1967) tarafından geliştirilmiştir. Nahmias ve Rivera (1979) ise çalışmasında tamir edilmiş ve edilmemiş iki tür öğeyi stoklayan bir envanter modeli incelemektedir. Richter (1997) çalışmasında ise hem üretim hem de onarım için değişken kurulum numaralarına sahip ESM modeline atık bertarafı eklemiştir. Hayek ve Salameh (2001) çalışmasında stoksuzluğa izin verilerek kusurlu ürünlerin tamamını yeni gibi yapabilen bir EÜM modeli geliştirmiştir. Chan vd. (2003) çalışmasında üç tip ürünü baz alarak bu ürünleri tamir edilebilir kusursuz ve iskarta olarak farklı fiyatlarla satıla bilirlüğünü ortaya koymuştur. Dobos ve Richter (2003) ve (2004) Son zamanlarda yaptıkları çalışmalarda tersine lojistik ile tamir/üretim ve atık materyallerini içeren model öne sürdüler daha sonra bu modele öğrenme etkisini ekleyerek yeni bir EÜM üzerine çalışmışlardır. Eroğlu vd. (2008) çalışmasında iyi ve kusurlu ürünlerin taranmasıyla sipariş edilen her partinin kusurlu ve eksiklikler içerdiği bir ESM modeli geliştirmişlerdir. Taleizadeh vd. (2013) çalışmasında hurda ve yeniden işleme süreçlerini kesintilerle birlikte ekonomik üretim miktarı envanter modeli geliştirmiş ve analiz edilmiştir. Glock ve Jaber (2013) çalışmasında optimal olmayan büyük partili mallar üretebilir ve tedarik zincirine kusurlu ürünlerin girebileceği bir çalışma ortaya koymuştur ve yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Kozlovskaya vd. (2015) yeniden işleme maliyeti, atık/hurda bertaraf etme maliyeti ve değiştirme maliyeti için net çözüm bu çalışmada ortaya konulmuştur. Shah vd. (2018) çalışmasında maksimum kar elde edilmesi için kusurlu ürünleri tamir edildikten sonra hızlı bir şekilde üretime verilmesi göz önüne alınarak çevrim süresi dikkate alınmıştır. Khalilpourazari vd. (2020) Bu çalışma yeniden işleme ve kusurlu ürünleri içeren ve çok bileşenli EÜM formülasyonunu geliştirmeyi amaçlamışlardır.

2.3. Geri dönüşüm (Recovery process)

Koh vd. (2002) çalışmasında sabit talebin geri dönüştürülmüş ürün ve yeni satın alınan ürünlerle karşılanabileceği ortak bir ESM ve EÜM modelini aynı anda sunmuştur. Teunter (2003) çalışmasında kurtarılan (geri kazanılan) ürünler yeni kadar iyi olduğu ve yeni ürünlerle aynı talebi karşılayan bir envanter sistemi üzerinde çalışmışlardır. Fleischmann ve Kuik (2003) çalışmasında tekrardan kullanım fonksiyonunun envanter kontrol sistematik analizi açısından önemi öne sürmüşlerdir. Choi vd. (2007) çalışmasında Koh vd (2002) deki çalışmasına benzer olarak yapılmış ek olarak kullanılmış ürünler sabit bir oranla müşterilerden toplandığı ESM ve EÜM modeli geliştirmiştir. Konstantaras ve Skouri (2010) çalışmasında talebin üretim ve geri dönüşümden karşılanabileceği bir üretim ve yeniden üretim sistemini ele almışlardır. Hishamuddin vd. (2012) çalışmasında tek aşamalı bir üretim ve envanter sistemi için geliştirilen kusurlu ürünlerinde yeni bir bozulma giderme modeli sunulmaktadır. Giri ve Sharma (2015) çalışmasında sabit talep ve arz kesintisi altında ham madde tedarikçisi, üretici, perakendeci ve kullanılmış ürünleri tüketiciden toplayan bir toptancıdan oluşan kapalı döngü seri tedarik zincirini ele alan optimum üretim politikası sunan bir model geliştirmişlerdir. Kozlovskaya vd. (2016) çalışmasında yeniden üretim sürecinde ürünleri birden fazla alıcı ve bir tedarikçiden oluşan bir model öne sürmüşlerdir. Marshall ve Vierstra (2018) çalışmasında iki tür yeniden üretim ile ürünlerin kazanılması ve kazanılan materyalleri birleştirerek yeni bir ürünün ortaya çıkmasını ele alan bir model ortaya sürmüştür. Chen ve Bidanda (2019) çalışması ise kaynak geri dönüşümü ve emisyon azaltımı şeklinde iki sürdürülebilir üretim stratejisine dayanmaktadır. Tam zamanda üretim lojistiği, bileşen geri kazanımı ve emisyon kontrolü ile birden çok fabrikanın üretim envanteri sorununu ele alınmıştır. Yapılan en güncel çalışma Rani vd. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yeşil tedarik zincirinde eşzamanlı üretim ve yeniden üretim ile yine bir entegre model geliştirmişlerdir.

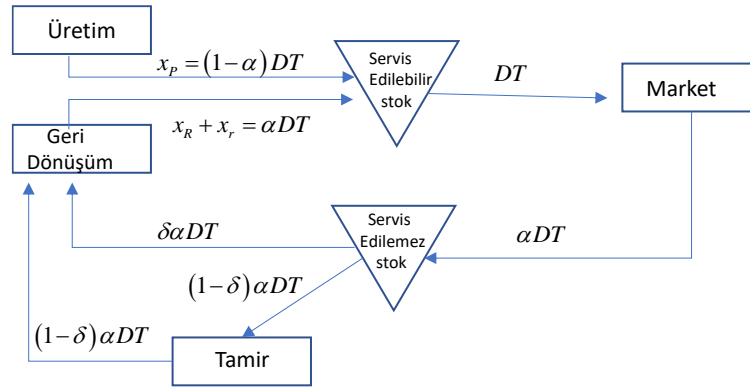
Bilimsel yazın araştırmaları sonucu bu çalışma ile; geri dönüşüm envanter modelleri ve geri dönüşüm yapılamayan

kısımda yeniden işleme sürecinin devreye girdiği durumları geliştirerek matematiksel model ve yeni araştırma ortaya konulması ile araştırmacılara, endüstri uygulayıcılarına ve bilimsel yazına katkı sağladığı düşünülmektedir.

3. Önerilen Envanter Modeli (Proposed Inventory Model)

Önerilen tamir durumunu içeren envanter geri dönüşüm modeli; Dobos ve Richter (2004) modeli ele alınarak geri dönüşüm sürecine ek olarak hurda olarak atılan ürünlerin tamamının tamir edilerek geri dönüşüme kazandırılması politikası ön görülmüştür. Matematiksel model kurma sürecinde endüstriyel (gerçek hayat) model hakkında ölçülemeyen ve/veya gerçekte var olan durumların modele yansıtılmasında bazı model varsayımlarına başvurulabilmektedir. Önerilen modele ait süreç işleyişi Şekil 1’de verilmiştir. Bu çalışma hem geri dönüşüm hem de iyileştirme durumları altında aşağıdaki varsayımlar altında geliştirilmiştir:

- Talep, belirleyici ve bilinendir.
- Kullanılmış ürünler, sabit ve belirli oranda müşterilerden toplanmışlardır.
- Toplanan ürünlerin belirli bir orandaki kısmı yenisi kadar iyileştirilebilmektedir.
- Maliyet parametreleri, bilinen sabitlerdir.
- Satın alma ve geri kazanım yönlendirme süreleri, belirli ve sabittir.
- Üretimde ve süreçte kesintilere/duraksamalara izin verilmemiştir.
- Ürünleri tamir etmek, satın almaktan daha ekonomiktir.
- Geri kazanım oranı toplama oranından daha küçüktür.
- Talep oranı, toplama oranından daha büyüktür.



Şekil 1. Önerilen tamir/yeniden işleme geri dönüşüm envanter modeli (The proposed inventory model for recovery items with rework)

Notasyon

D : talep oranı (demand rate)

$R = D/\gamma$, ($\gamma < 1$) : geri dönüşüm oranı (recycling rate)

$R_1 = D/\lambda$, ($\lambda < 1$) : tamir oranı (rework rate)

$P = D/\beta$, ($\beta < 1$) : üretim oranı (production rate)

$d = \alpha D$, ($0 \leq \alpha \leq 1$) : geri alım miktarı (buyback rate)

α : marginal buyback rate

δ : marginal use rate

T : üretim ve geri dönüşüm dahil toplam çevrim süresi (length of a production and recycling cycle)

x_R : geri dönüşümden üretilen servis edilebilir ürün sayısı (recycling lot size)

x_r : tamirden gelen servis edilebilir ürün sayısı (rework lot size)

x_p : üretimde üretilen servis edilebilir ürün sayısı (production lot size)

T_R : geri dönüşüm üretim süresi (time interval of recycling)

T_p : üretim süresi (time interval of production or production time per cycle)

T_n : tamirden sonraki üretim olmayan süre (time interval after rework process)

S_R : geri dönüşüm için hazırlık maliyeti (setup cost of recycling)

S_P : üretim için hazırlık maliyeti (setup cost of production)

h_s : servis edilebilir ürünler için stok maliyeti (holding cost of serviceable items)

h_n : servis edilemeyen ürünler için stok maliyeti (holding cost of non-serviceable items)

c_p : birim üretim maliyeti (unit production cost)

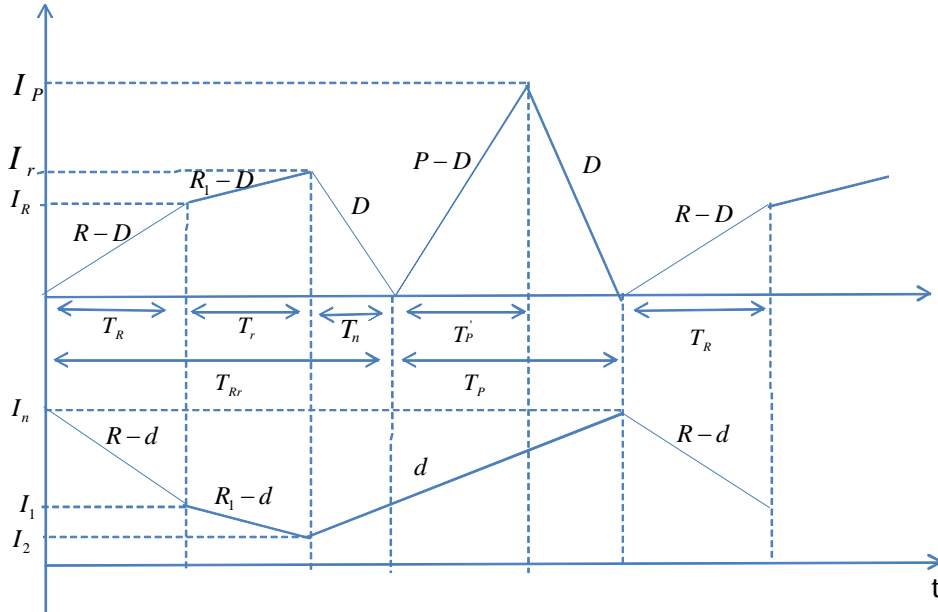
c_R : birim geri dönüşüm maliyeti (unit recycling cost)

c_r : birim tamir maliyeti (unit rework cost)

c_B : birim geri alım maliyeti (unit buyback cost)

Şekil 1'e göre, başlangıçta fabrikada (işletmede) üretilen ürünler, müşteriye ulaşması için piyasaya DT oranında sunulur. Daha sonra bu DT oranında sunulan ürünlerin piyasadan (marketten) αDT oranında geri toplandığı varsayılmaktadır. Toplanan ürünler, işletmeye ilk geldiğinde servis edilemez alana gelirler. Servis edilemez tipindeki ürünler bir ayıklama sürecinden geçmektedirler. Geri dönüşümü mümkün olmayan ürünler tamir bölümüne giderler. Bu işlem sonucunda ürünlerin $\delta\alpha DT$ oranında geri dönüşüm bölümüne ve $(1-\delta)\alpha DT$ oranında da tamir bölümüne gitmektedir. Daha sonra geri dönüşüm ve tamir işlemleri başlamaktadır. Tamir işlemi görmüş ürünler tekrardan geri dönüşüm bölümüne giderek orada bir işleme daha tabi tutulurlar. Son olarak ta αDT oranında geri dönüşüm ve tamirden gelen servis edilebilir ürün ortaya çıkmaktadır. Bir sonraki periyotta üretim hem geri dönüşümden sağlanan ürün hem de fabrikada üretilen ürünle sağlanarak devam etmektedir. Önerilen envanter modelinde; müşterilerden sabit oranda toplanan kullanılmış ürünler daha sonra kullanılabilir hale getirilmektedir.

Envanter düzeyi



Şekil 2. Önerilen yeniden işleme geri dönüşüm envanter modeli için zaman boyunca envanter değişimi (Inventory level over time horizon for the proposed inventory model for recovery items with rework)

Şekil 2'ye göre envanter değişim düzeylerine göre matematiksel eşitlikler türetilirken; geri dönüşüm, tamir ve üretimin servis edilebilir maksimum stokları ve servis edilemeyen stok seviyeleri gösterilmektedir. Çevrim süresince (T) oluşan talep miktarının (DT), $\delta\alpha DT$ adedi geri dönüşümden, $(1-\delta)\alpha DT$ adedi tamirden ve $(1-\alpha)DT$ adedi ise üretimden dan karşılanmaktadır. Dolayısı ile bu durumda;

Geri dönüşümdeki üretim miktarı, x_R ,

$$x_R = \delta\alpha DT \quad (1)$$

Tamir edilen miktar x_r ,

$$x_r = (1 - \delta)\alpha DT \quad (2)$$

Üretilen miktar x_p ,

$$x_p = (1 - \alpha)DT \quad (3)$$

Geri Dönüşüm Üretim süresi, T_R ,

$$T_R = x_r / R = \delta\gamma\alpha T \quad (4)$$

Tamir üretim süresi T_r ,

$$T_r = x_r / R_1 = (1 - \delta)\lambda\alpha T \quad (5)$$

Sıfırdan üretim süresi T_p ,

$$T_p = x_p / D = (1 - \alpha)T \quad (6)$$

Üretimin yapıldığı süre T_p'

$$T_p' = x_p / P = (1 - \alpha)\beta T \quad (7)$$

Şekil 2 göz önüne alarak yapılan hesaplamalardan iki tane geri dönüşüm süresi formülü, iki tane tamir süresi, üretim süresi ve geri dönüşüm talebinin karşılandığı süreler hesaplanır.

$$T_R = \frac{I_R}{R - D} \quad (8)$$

$$T_R = \frac{I_n - I_1}{R - \alpha D} \quad (9)$$

$$T_r = \frac{I_r - I_R}{R_1 - D} \quad (10)$$

$$T_r = \frac{I_1 - I_2}{R_1 - \alpha D} \quad (11)$$

$$T_n = \frac{I_r}{D} \quad (12)$$

$$T_p' = \frac{I_p}{P - D} \quad (13)$$

Eşitlik 4 ve 8 birleştirilerek geri dönüşüm maksimum stok seviyesi elde edilir:

$$I_R = (1 - \gamma)\delta\alpha DT \quad (14)$$

Eşitlik 5, 10 ve 14'ten yararlanarak tamir maksimum stok seviyesi elde edilir:

$$I_r = [(1 - \lambda) + (\lambda - \gamma)\delta]\alpha DT \quad (15)$$

Eşitlik 12 ve 15 ile ise; geri dönüşümden talebin karşılandığı yani T_n tekrardan elde edilir:

$$T_n = [(1-\lambda) + (\lambda-\gamma)\delta] \alpha T \quad (16)$$

Eşitlik 7 ve 13'ten yararlanarak üretim maksimum stok seviyesi elde edilir:

$$I_p = (1-\beta)(1-\alpha)DT \quad (17)$$

Tamir sonrası servis edilemeyen miktar (I_2) ise aşağıdaki Eşitlik 18'de ki hesaplanır:

$$I_2 = (T_R + T_r) \delta \alpha D + T_r (1-\delta) \alpha D = [\delta^2 \gamma + \lambda(1-\delta)] \alpha^2 DT \quad (18)$$

Eşitlik 5, 11 ve 18'den yararlanarak geri dönüşüm sonrası servis edilemeyen miktar elde edilir:

$$I_1 = \{(1-\lambda\alpha)(1-\delta) + \alpha[\delta^2 \gamma + \lambda(1-\delta)]\} \alpha DT \quad (19)$$

Eşitlik 4, 9 ve 19'dan yararlanılarak servis edilemeyen maksimum stok seviyesi Eşitlik 20 olarak elde edilir:

$$I_n = [1 - \delta\gamma\alpha(1-\delta)] \alpha DT \quad (20)$$

Çevrim başına toplam maliyetin içerisinde birim başına tamir maliyeti, birim başına geri alım maliyeti, birim başına geri dönüşüm maliyeti, birim başına üretim maliyeti, servis edilebilir ürünler için stok maliyeti ve servis edilemeyen ürünler için stok maliyeti gibi maliyet birimleri vardır.

$$C_T = c_r (1-\delta) \alpha DT + c_B \alpha DT + c_p (1-\alpha) DT + c_R \delta \alpha DT + s_R + s_P \\ + h_s \left(\frac{I_R T_R}{2} + \frac{(I_R + I_r) T_r}{2} + \frac{I_r T_n}{2} + \frac{I_p T_p}{2} \right) + h_n \left[\frac{(I_1 + I_n) T_R}{2} + \frac{(I_1 + I_2) T_r}{2} + \frac{(I_2 + I_n)(T_n + T_p)}{2} \right] \quad (21)$$

Gerekli değişkenler yerine yazıldığında ve sadeleştirme işlemi yapıldığında çevrim başına toplam maliyet Eşitlik 22'de ki gibi elde edilir:

$$C_T = \left[c_r (1-\delta) + c_B + c_p \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) + c_R \delta \right] \alpha DT + s_R + s_P \\ + \left\langle h_s \left\{ \delta(\delta-2)(\gamma-\lambda) + (1-\lambda) + (1-\beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2-\delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 DT^2 / 2 \quad (22)$$

Ardından birim zaman başına toplam maliyet (C_U), hesaplarken de (C_T / T) işlemiyle Eşitlik 23 olarak elde edilir:

$$C_U = \left[c_r (1-\delta) + c_B + c_p \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) + c_R \delta \right] \alpha D + \frac{s_R + s_P}{T} \\ + \left\langle h_s \left\{ \delta(\delta-2)(\gamma-\lambda) + (1-\lambda) + (1-\beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2-\delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 DT / 2 \quad (23)$$

Eşitlik 23 için türev alınıp sifıra eşitlenirse eşitliğin geniş hali Eşitlik 24'te olduğu gibi elde edilir:

$$\frac{dC_U}{dT} = -\frac{s_R + s_P}{T^2} + \left\langle h_s \left\{ \delta(\delta - 2)(\gamma - \lambda) + (1 - \lambda) + (1 - \beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2 - \delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 D / 2 \quad (24)$$

Sonuçta; Eşitlik 24 çözümüyle optimal çevrim süresi (T^*) Eşitlik 25 olarak elde edilir:

$$T^* = \sqrt{\frac{2(s_R + s_P)}{\left\langle h_s \left\{ \delta(\delta - 2)(\gamma - \lambda) + (1 - \lambda) + (1 - \beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2 - \delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 D}} \quad (25)$$

Burada; $\frac{dC_U}{dT} = \frac{2(s_R + s_P)}{T^3} > 0$ olduğu için C_U maliyet fonksiyonu kesinlikle konvektir (dışbükey).

4. Hesaplamalı Sonuçlar (Computational Results)

4.1. Sayısal Örnek (Numerical Instance)

Bu bölümde geliştirilen geri dönüşüm modeli, Dobos ve Richter (2003) çalışmasında verilen sayısal örneğe uyarlanmıştır. Sayısal örneğe ait girdi değerleri Tablo 1'de ve önerilen model ile elde edilen sayısal çözümler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Sayısal örnek girdi verileri (Numerical instance input data)

$D = 1200$ adet	$h_w = 20$ \$	$\lambda = 0,9$	$S_R = 72$	$c_B = 60$ \$
$h_s = 12$ \$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\delta = \frac{2}{3}$	$S_p = 144$	$c_R = 30$ \$
$h_n = 3$ \$	$\gamma = \frac{2}{3}$	$\alpha = \frac{1}{2}$	$c_r = 50$ \$	$c_p = 120$ \$

Tablo 2. Sayısal örnek çözüm sonuçları (Numerical instance results)

$C_U = \$131388$	$T = 113.56$ gün	$T_p = 56.78$ gün		
$T'_p = 38.93$ gün	$T_R = 25.23$ gün	$T_r = 17.03$ gün	$T_n = 14.51$ gün	$I_r = 47.70$ adet
$I_n = 177.77$ adet	$I_p = 62.22$ adet	$I_R = 41.48$ adet	$I_1 = 89.88$ adet	$I_2 = 55.65$ adet

4.2. Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis)

Bu bölümde önerilen model için marjinal geri alım oranı (α), kullanım oranı (δ), üretim oranı (β), tamir oranı (λ), talep (D) ve geri dönüşüm oranı (γ) değerleri için birim zamandaki toplam maliyet açısından bir tam faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımı faktörleri ve seviyelerine ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir. 6 faktör 3 seviye olacak şekilde tasarlanan tam faktöriyel deney tasarımı modelinde L27 deney tasarımı modeli kurulmuştur. Bu göre L27 tasarımı ile elde edilen birim zamanda toplam maliyet, geri dönüşüm, tamir ve yeniden üretim parti büyüklüğüne göre değişim sonuçları hesaplanmış ve varyans analizi sonuçları ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Duyarlılık analizi seviyeleri (Levels for sensitivity analysis)

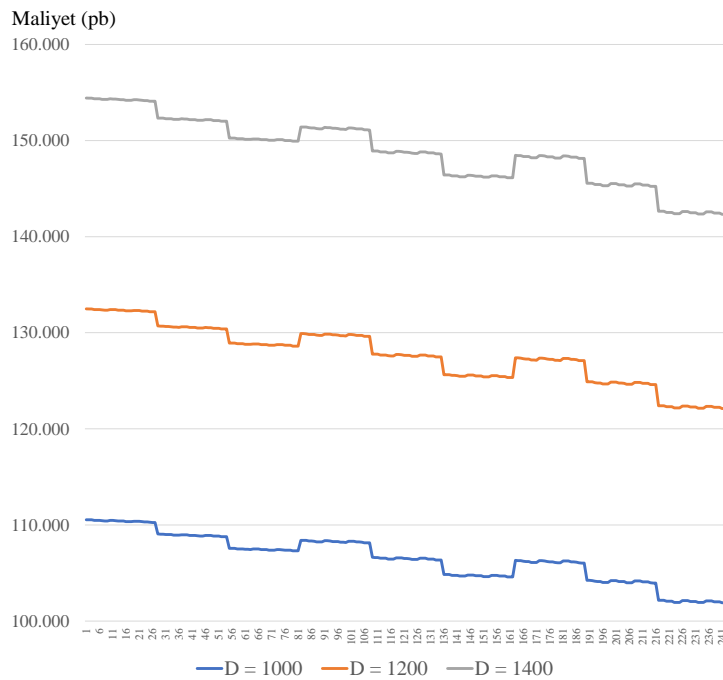
	D	α	δ	β	λ	γ
Seviye 1	1000	0.50	0.60	0.33	0.33	0.7
Seviye 2	1200	0.60	0.75	0.50	0.50	0.8
Seviye 3	1400	0.70	0.90	0.67	0.67	0.9

Tablo 4. L27 deney tasarımı için varyans analizi sonuçları (L27 experimental design and variance analysis results)

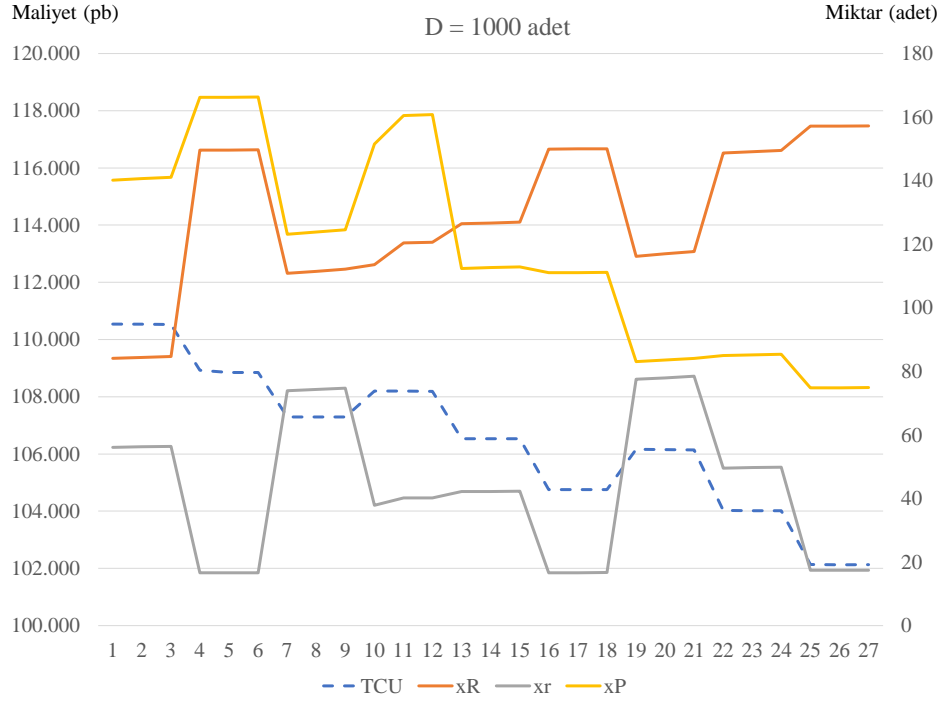
Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
α	2	103722820	51861410	233403.39	0
δ	2	57212296	28606148	128742.58	0
β	2	361174	180587	812.74	0
γ	2	166346	83173	374.32	0
λ	2	1272	636	2.86	0.087
Hata	16	3555	222		
Toplam	26	161467463			

Sonuçlar detaylı olarak incelendiğinde, önerilen envanter modelinde toplam maliyet değerini; marjinal geri alım oranındaki değişim (α) %64,24 seviyesinde etkilerken, kullanım oranındaki değişim (δ) ise %35,43 seviyesinde etkilemektedir. Tabi bu iki oran doğrudan geri dönüşüm süreci incelenen ürünün geri dönüşüm süreç tasarımı ile doğrudan ilgilidir. Geri dönüşümü daha fazla mümkün olan ürün/ürün grupları için ürünün pazardan geri toplanabilme oranı ve toplanan ürünlerin geri dönüşümde kullanılabilme oranları belirleyicidir. Önerilen model de üretim oranı (β), tamir oranı (λ) ve geri dönüşüm oranı (γ) seviyelerindeki değişimler birim zamanda toplam maliyet üzerinde çok anlamlı bir etkiye sahip değildir.

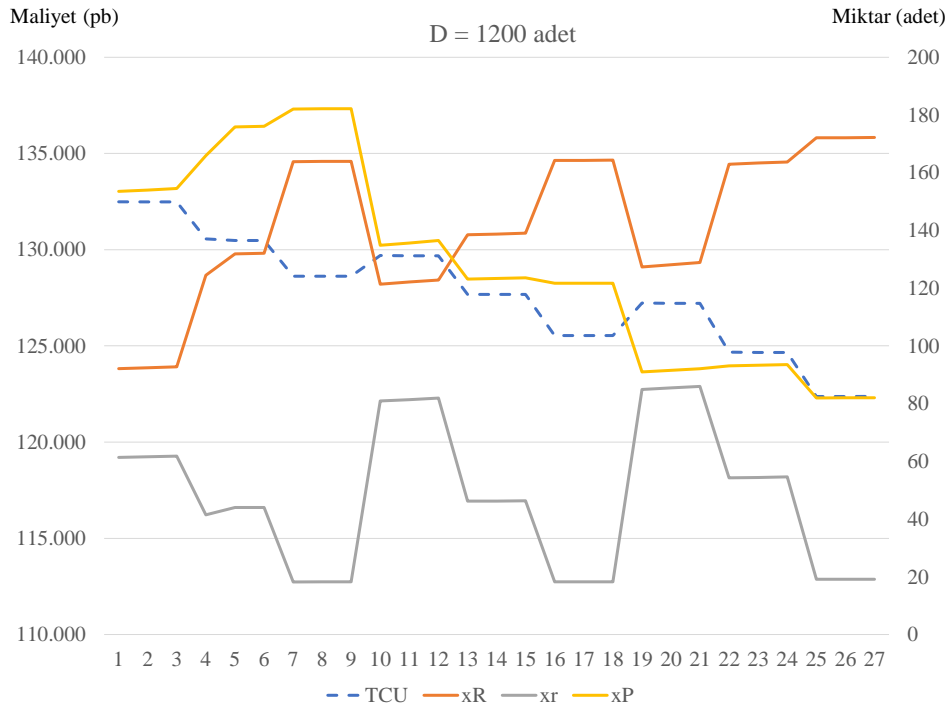
Öte yandan bu çalışmada, talep (D) değerlerindeki değişim seviyesi ise ayrıca ele alınmıştır ve ilgili maliyet değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre, her üç talep seviyesi için örüntünün benzer şekilde davrandığı görülmektedir. Talep seviyesi envanter modelleri için önemli bir göstergedir ancak doğrudan toplam maliyeti de etkilemektedir. Dolayısıyla Şekil 3'te elde edilen sonuçlar talep seviyesi azaldıkça birim zamanda toplam maliyet değerinin de azalması şeklinde beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.

**Şekil 3.** Farklı Talep Seviyeleri için Birim Zamanda Toplam Maliyet Değişimi (Changes on the total cost unit time for the demand levels)

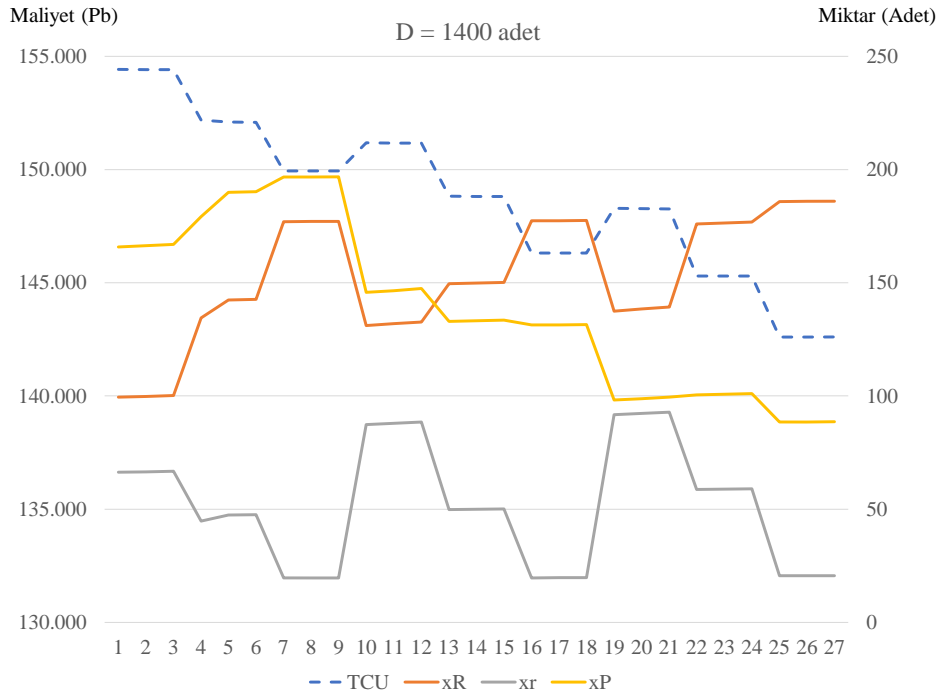
Benzer şekilde, üç talep seviyesi için ayrı ayrı L27 deney tasarımı sonuçları sırasıyla D=1000 adet, D=1200 adet ve D=1400 adet olacak şekilde Şekil 4-6 ile verilmiştir. Şekillerde sol eksende maliyet ve sağ eksende miktar bilgisi yer almaktadır. Bu kısımdaki analizde ise, geri dönüşümden üretilen servis edilebilir ürün sayısı (x_R), tamirden gelen servis edilebilir ürün sayısı (x_r) ve üretimde üretilen servis edilebilir ürün sayısı (x_P) üzerindeki değişimlerin örüntüleri benzer davranış göstermektedir.



Şekil 4. D=1000 için L27 deney tasarımı sonuçları (L27 experimental design results for D=1000)



Şekil 5. D=1200 için L27 deney tasarımı sonuçları (L27 experimental design results for D=1200)



Şekil 6. D=1400 için L27 deney tasarımı sonuçları (L27 experimental design results for D=1400)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Her geçen gün gelişen ve artan nüfus dolayısı ile tüketen toplumun hızla artmasıyla birlikte geri dönüşüm sektörü, iş dünyası ve yeşil çevre için öne her geçen gün artmaktadır. Yaşadığımız dünyada kaynaklar sınırlı olmakla birlikte, doğal ve fosil kaynaklar da gün geçtikçe azalmaktadır. Geri dönüşüm, atıkların önlenmesi ve tekrar dünyaya kazandırılması ve doğal kaynaklarımızı verimli kullanılması için en yetkin yöntemdir. Bunun yanı sıra geri dönüşüm ekonomik fırsatlar ortaya koymakla birlikte kaynak verimliliğine de katkı sağlamaktadır. Dünyada ve yine ülkemizde geri dönüşüme yapılan teşvikler, atıkların yönetimi hususunda toplumsal farkındalığı ve sosyal farkındalığı güçlendirici projeler görülmektedir. Günümüzde üretim miktarlarının artmasıyla birlikte gerek kaynakların gerekse çevrenin korunması amacıyla yeşil üretim denilen yeni bir aşamaya geçilmiştir. Gerçekleştirilen modellerde ve yapılan her işte yeşil üretim bilinci artmakta ve önemsenmektedir. Bu süreçte önemli bir başlangıç noktası olarak geri dönüşüm imkanları da özellikle tedarik zinciri yönetimi boyunca bu dönüşüm sürecinin kapalı-döngü yaklaşımıyla birçok yeni model ile desteklediği bilimsel yazında etkili bir yere sahiptir. Daha önceki çalışmalarda tamir ve geri dönüşüm sürecinin aynı anda yer aldığı envanter modeli önerilmemiştir. Birçok çalışmada atık atılırken bu çalışmada atık bırakmadan tamamının tamir yardımıyla geri dönüştürülmektedir. Bu durum sayısal bir uygulama örneği ile desteklenmiştir. Ayrıca talep, marjinal geri alım oranı ve kullanım oranı birim zamanda toplam maliyet gibi matematiksel maliyetleri ve çevrim sürelerinin değişim sonuçları için altı faktör üç seviye olacak şekilde bir tam faktöriyel L27 deney tasarımı uygulaması gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar tartışılmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akçalı, E., & Çetinkaya, S. 2011. Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2373-2407.
- Chan, W. M., Ibrahim R. N., Lochert, P. B., 2003. A new EPQ model: integrating lower pricing, rework and reject situations, *Production Planning and Control*, 14 (7), 588-595.
- Chen, Z., & Bidanda, B. (2019). Sustainable manufacturing production-inventory decision of multiple factories with JIT logistics, component recovery and emission control. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 128, 356-383.
- Choi, D. W., Hwang H., Koh, S., 2007. A Generalized Ordering and Recovery Policy for Reusable Items, *European Journal of Operational Research*, 182, 764-774,
- Chung K. J., Hou, K. L., 2003. An optimal production run time with imperfect production processes and allowable

- shortages, *Computers and Operations Research*, 30, 483-490.
- De Giovanni, P., 2019. An optimal control model with defective products and goodwill damages, *Annals of Operations Research*, 1-12,
- Dobos I., Richter, K., 2003. A Production /Recycling Model With Stationary Demand And Return Rates, *Central European Journal of Operations Research*, 11, (1) 35-46.
- Dobos I., Richter, K., 2004. An extended production/recycling model with stationary demand and return rates, *International Journal of Production Economics*, 90, (3) 311-323.
- Eroglu A., Ozdemir, G., 2007. An economic order quantity model with defective items and shortages, *International Journal of Production Economics*, 106, (2), 544-549.
- Eroglu, A., Sütçü A., Sulak, H., 2008. An Economic Production Quantity Model with Random Defective Rate In Imperfect Production Processes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23, (4) 923-929.
- Eroglu, R., 2019 Geri dönüşüm süreci için yeni bir envanter modeli geliştirilmesi Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J.A., Van Wassenhove, L.N., 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research* 103, 1-17.
- Fleischmann, M., Kuik, R., 2003. On optimal inventory control with independent stochastic item returns, *European Journal of Operational Research*, 151, (1), 25-37.
- Glock, C. H., & Jaber, M. Y., 2013. An economic production quantity (EPQ) model for a customer-dominated supply chain with defective items, reworking and scrap. *International Journal of Services and Operations Management*, 14(2), 236-251.
- Giri, B. C., Sharma, S., 2015. Optimizing a closed-loop supply chain with manufacturing defects and quality dependent return rate, *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 92-111.
- Giri, B. C., & Sharma, S. 2016. Optimal production policy for a closed-loop hybrid system with uncertain demand and return under supply disruption. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2015-2028.
- Hayek P. A., Salameh, M. K., 2001. Production Lot Sizing with the Reworking of Imperfect Quality Items Produced, *Production Planning and Control*, 12, (6) 584-590.
- Hishamuddin, H., Sarker R. A., Essam, D., 2012. A disruption recovery model for a single stage production-inventory system., *European Journal of Operational Research*, 222, (3) 464-473.
- İnternet-1, (2018), "What is zero-waste?," [Online]. Available: <http://zerowaste.gov.tr/en/zero-waste/what-is-zero-waste>. [Accessed 27 11 2018].
- Jaber, M. Y., & El Saadany, A. M. (2009). The production, remanufacture and waste disposal model with lost sales. *International Journal of Production Economics*, 120(1), 115-124.
- Khalilpourazari, S., Mirzazadeh, A., Weber, G. W., & Pasandideh, S. H. R., 2020. A robust fuzzy approach for constrained multi-product economic production quantity with imperfect items and rework process. *Optimization*, 69(1), 63-90.
- Khara, B., Dey, J. K., & Mondal, S. K., 2020. Sustainable recycling in an imperfect production system with acceptance quality level dependent development cost and demand. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106300.
- Kim, C. H., Y. Hong, Y., An 1999. Optimal Production Run Length in Deteriorating Production Processes, *International Journal of Production Economics*, 58, 183-189.
- Koh, S. G., Hwang, H., Sohn K. I., Ko, C. S., 2002. An optimal ordering and recovery policy for reusable items. , *Computers & Industrial Engineering*, 43 (1-2,) 59-73.
- Konstantaras I., Skouri, K., 2010. Lot Sizing for a Single Product Recovery System with Variable Setup Numbers, *European Journal of Operational Research*, 203, 326-335.
- Kozlovskaya, N., Pakhomova N., Richter, K., 2015. Complete solution of the extended EOQ repair and waste disposal model with switching costs (No. 376), *European University Viadrina, Frankfurt (Oder)*.
- Kozlovskaya, N., Pakhomova, N., Richter, K., 2016. A general production and recovery EOQ model with stationary demand and return rates (No. 378). *Discussion Paper.*, "European University Viadrina, Frankfurt (Oder).
- Lafforgue, G., & Rouge, L. (2019). A dynamic model of recycling with endogenous technological breakthrough. *Resource and Energy Economics*, 57, 101-118.
- Marshall, R. S., Vierstra, R. D., 2018 "Autophagy: the master of bulk and selective recycling," *Annual Review of Plant Biology*, 69, 173-208.
- Mawandiya, B. K., Jha, J. K., & Thakkar, J. (2017). Production-inventory model for two-echelon closed-loop supply chain with finite manufacturing and remanufacturing rates. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 4(3), 199-218.
- Nahmias, S., Riviera, H., A., 1979. Deterministic model for a repairable item inventory system with a finite repair rate, *International Journal of Production Research*, 17, (3) 215-221.
- Pishchulov, G., Dobos, I., Gobsch, B., Pakhomova, N., & Richter, K. (2014). A vendor-purchaser economic lot size problem with remanufacturing. *Journal of Business Economics*, 84(5), 749-791.
- Rani, S., Ali, R., & Agarwal, A. (2020). Inventory Model for Deteriorating Items in Green Supply Chain with Credit Period Dependent Demand. *International Journal of Applied Engineering Research*, 15(2), 157-172.

- Rezaei, J., 2016. Economic order quantity and sampling inspection plans for imperfect items, *Computers & Industrial Engineering*, 96, 1-7.
- Richter, K., 1997. Pure and Mixed Strategies for The EOQ Repair and Waste Disposal Problem, *OR Spectrum*, 19, (2) 123-129.
- Rosenblatt, M., Lee, H., 1986. Economic production cycles with imperfect production processes, *IIE Transactions*, . 18, 1, 48-55.
- Saberi, S. (2018). Sustainable, multiperiod supply chain network model with freight carrier through reduction in pollution stock. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 421-444.
- Salameh, M. K., Jaber, M. Y., 2000. Economic Production Quantity Model For Itemswith Imperfect Quality, *International Journal of Production Economics*, 64, 59-64.
- Sana, S. S., 2010. An Economic Production Lot Size Model in An Imperfect Production System, *European Journal of Operational Research*, 201, 158-170.
- Sanjai, M., Periyasamy, S., 2019. An inventory model for imperfect production system with rework and shortages. *International Journal of Operational Research*, 34(1), 66-84.
- Schrady, D., 1967. A Deterministic Inventory Model for Repairable Items, *Naval Research Logistics*, 14, (3), 391-398.
- Shah, N. H., Patel D. G., Shah, D. B., 2018. EPQ model for returned/reworked inventories during imperfect production process under price-sensitive stock-dependent demand, *Operational Research*, 18, (2) 343-359.
- Taleizadeh, A. A., Cardenas-Barron L. E., Mohammadi, B., 2013. A Deterministic Multi Product Single Machine EPQ Model with Backordering, Scraped Products, Rework and Interruption in Manufacturing Process, *International Journal of Production Economics*, 150, 9-27.
- Teunter, R., 2003. Lot-sizing for inventory systems with product recovery, *Econometric Institute Report*, 28, 1-16,
- Wee, H. M., Wang, W. T., & Yang, P. C. (2013). A production quantity model for imperfect quality items with shortage and screening constraint. *International Journal of Production Research*, 51(6), 1869-1884.



TÜRK İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KURUMSAL KAYNAK PLANLAMA (ERP) SİSTEMLERİNİN KULLANIMI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Hande ALADAĞ*

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kurumsal Kaynak Planlama, İnşaat Sektörü, Proje Yönetimi, Yönetim Bilgi Sistemleri.

Öz

Türk inşaat sektörünün, sürdürülebilir performansını devam ettirebilmesi için sektörün önde gelen firmalarının üstlendikleri projeleri daha etkin sistemlerle yönetmesi gerekmektedir. Bu gerekliliği karşılayabilmek amacıyla ise Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemlerine olan ilgileri ve ihtiyaçları her geçen gün artmaktadır. Özellikle son birkaç sene içerisinde çok sayıda inşaat firması ERP sistemlerine yatırım yapmış olsa da yapılan bu yatırımların azımsanmayacak bölümü başarısızlıkla sonuçlanmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini kullanırken yaşadıkları zorlukları araştırmak ve daha başarılı uygulamalar elde edilmesi için çözüm önerileri sunmaktır. Çalışmanın amacı doğrultusunda ERP sistemlerini bünyesine uyarlamış 62 adet Türk inşaat firması ile bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise, firmaların ERP adaptasyonunda başarı sağlamaları için çözüm önerileri paylaşılmıştır. Ortaya koyulan çözüm önerileri, ERP sistemlerini uygulamak isteyen inşaat firmalarının kendilerine uygun bir yol haritası hazırlaması için gerekli altyapıyı sağlaması aşamasında faydalı olacağı gibi, Türk inşaat şirketlerinin küresel rekabet edebilirliklerini arttırarak Türk inşaat sektörünün sürdürülebilir performansının sağlanmasına katkıda bulunacaktır.

A RESEARCH ON THE USE OF ENTERPRISE RESOURCE PLANNING (ERP) SYSTEMS IN THE TURKISH CONSTRUCTION INDUSTRY

Keywords

Enterprise Resource Planning (ERP), Construction Industry, Project Management, Management Information System (MIS).

Abstract

Turkish construction companies should manage their projects with more effective systems to maintain the sustainable performance of construction industry. Therefore, construction companies' interest and needs in Enterprise Resource Planning (ERP) systems are increasing to meet this requirement. Especially in the last few years, many construction companies have invested in ERP systems however a considerable part of these investments result in failure. In this context, the main purpose of this study is to investigate the difficulties that Turkish construction companies are facing while using ERP systems and to offer solutions for more successful implementations. In line with this purpose, a survey was conducted with 62 Turkish construction companies that have adapted ERP systems. Then, suggestions were made for construction companies to achieve success in ERP adaptation. The proposed solutions will not only be useful in providing the necessary infrastructure for construction companies that want to implement ERP systems and to prepare a suitable roadmap, but also will contribute to the sustainable performance of the Turkish construction industry by increasing the global competitiveness of Turkish construction companies.

Alıntı / Cite

Aladağ, H., (2020). Türk İnşaat Sektöründe Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) Sistemlerinin Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1099-1112.

* İlgili yazar / Corresponding author: haladag@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5258

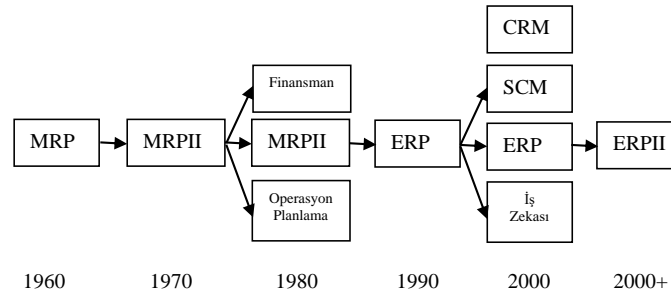
Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
H. Aladağ, 0000-0001-7627-8699	Başvuru Tarihi / Submission Date	06.09.2020
	Revizyon Tarihi / Revision Date	28.11.2020
	Kabul Tarihi / Accepted Date	05.12.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Küreselleşme ile artan rekabet, inşaat firmalarının daha üretken, verimli ve daha entegre bir şekilde iş yapmalarını gerekli kılmaktadır. Bir firmada veya bir projede malzeme, iş gücü, zaman ve finansal kaynakların en efektif şekilde kullanılmasını sağlamak için gerekli tüm işlemleri ve verileri bir araya getiren yani bir firmada süregelen tüm bilgi akışının bütünleşmesini sağlayan sistemler olarak tanımlanan Kurumsal Kaynak Planlama (ERP), inşaat firmalarının farklı bölümlerin entegrasyonu ile performans seviyelerini yükseltmelerine yardımcı olmaktadır. Her ne kadar, ERP sistemlerinin kullanımı inşaat firmalarının her geçen sene daha fazla ilgilendiği bir konu olsa da firmaların bu alanda yaptığı denemeler her zaman başarıyla sonuçlanmamaktadır. Başarısız denemeler sonucunda firmalar ciddi anlamda para, zaman ve motivasyon kaybı yaşayabilmektedirler. İnşaat sektörünün başarısının, inşaat firmalarının başarısı ile doğrudan ilişkili olduğu göz önüne alındığında inşaat firmalarında yaşanan bu başarısızlıkların bertaraf edilerek, ERP sistemlerinin kullanımıyla proje ve firma başarılarını arttıracak hususların adapte edilmesinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında Türk inşaat firmalarının ERP sistemleri ile ilgili tecrübeleri incelenerek, inşaat firmalarının ERP sistemlerini kullanma amaçları ve karşılaştıkları zorluklar araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak inşaat sektöründe ERP kullanımını inceleyen daha önceki çalışmalarla ilgili bir literatür çalışması yapılmıştır. Sonrasında ise, ERP sistemlerinin Türk inşaat firmalarındaki uygulamalarının daha detaylı anlaşılabilmesi için bir anket uygulanmıştır. Türk inşaat firmalarında görev alan ERP yöneticileri ile gerçekleştirilen anket çalışmasından elde edilen veriler ışığında, başarılı uygulamaların gerçekleştirilebilmesi için çözüm önerileri sunulmuştur. İnşaat firmalarında denetlenebilir ve sistematik büyüeyebilen yapıların kurulması ve sonraki nesillere devredilebilmesi için ERP sistemleri gibi bütünleşik iş uygulamalarının bir yönetim stratejisi olarak uygulanması gerekir. Bu bağlamda, çalışma bulguları firmaların stratejik performans yönetimi için veri oluşturacak olması açısından özel bir önem teşkil etmektedir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

ERP sistemleri, kaynakların işletmenin stratejileri doğrultusunda etkin ve verimli kullanımını sağlayan, tek bir veri tabanı ve bütünleşik bir ara yüz sağlayarak bir kurumun muhasebe-finance, bakım-onarım, proje takibi, yatırım, stok kontrol, malzeme, insan kaynakları yönetimi gibi tüm süreçlerinin ve verilerinin bütünleştirildiği ticari yazılım paketleridir (Davenport, 1998, Bingi vd., 1999; Klaus vd., 2000; Abdinnour-Helm vd., 2003; Voordijk vd., 2003; Shi ve Halpin, 2003; Yang vd., 2007). ERP sistemlerinin gelişimi, bilgisayar donanım ve yazılım sistemlerinin gelişimini yakından takip etmiştir. ERP sistemlerinin tarihsel gelişimine bakıldığında, temelinin 1960'lı yıllara dayandığı görülmektedir. 1960'lı yıllarda işletmelerde stokların sayımı ve kayıt altında tutulması elle yapıldığından siparişlerin zamanında teslimi, depoda bulunan mal stoku hakkında net bilgiye sahip olunamaması, ilerleyen yıllarda Malzeme İhtiyaç Planlaması (Material Requirements Planning: MRP) üzerine sistemlerin geliştirilmesini sağlamıştır (Demirkan, 2005). MRP sisteminin daha düşük stok düzeyi, daha az envanter tutma maliyeti, daha kısa üretim temin süresi, müşteriye zamanında teslim gibi kazanımlarına rağmen iş ve satın alma emirlerini iletirken fabrika kapasitesinin ilgili üretimi gerçekleştirmek için yeterli olmadığı eleştirisiyle Kapalı Çevrim Malzeme İhtiyaç Planlaması (Closed Loop MRP) sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemle mevcut kullanılabilir kapasite ile karşılaştırma yapılarak ana üretim planı geri besleme ile uyarılmaktadır (Demirkan, 2005). Ana üretim planına göre parça gereksinimlerini veya ürünün planlanmasını içeren MRP sistemlerini takiben 1980'li yıllarda ise, üretim ihtiyaçları ile malzemeleri senkronize ederek, üretim sürecinin en iyi şekilde kullanımını sağlayan ve yeni bir yazılım olan Üretim Kaynakları Planlaması (MRP-II) sistemleri geliştirilmiştir. 1990'lı yıllarda ise, artan küreselleşme ile firmalar tüm iş yapış şekillerini yeniden tasarlamaya başlayarak, uzak coğrafyalardan mal ve hizmet almaya ve sınırlar ötesine ürün ve hizmetlerini sunmaya başlamışlardır. Bu noktada MRP-II sistemlerinin sunduğu fonksiyonların, bir şirketin değişik coğrafi bölgelerdeki faaliyetlerini koordine edebilmesi için, tam zamanında üretim (Just in Time: JIT) tedarik felsefesine uyabilmek için yeniden tasarlanması ve geliştirilmesi gerekmiş ve sonuç olarak ERP sistemleri doğmuştur. 2000'li yılların başında ise bilgi ve iletişim teknolojisindeki gelişmelere birlikte ERP sistemleri, müşteri ilişkileri yönetimi (Customer Relationship Management: CRM), tedarik zinciri yönetimi (Supply Chain Management: SCM) ve iş zekası (Business Intelligence: BI) kavramlarını da kapsayarak içeriklerini genişletmiştir. Bu yeni sistem ise ERP II olarak adlandırılmıştır. ERP II ile ERP kavramı sadece üretici firmalara özel bir çözüm olmaktan çıkarak tüm diğer sektörlerde de hizmet eder hale gelmiştir. Ayrıca işin içine şirketin dışındaki tedarikçiler de dahil edilerek maliyet düşürme, tedarik zincirinin etkinliğini artırma ve iş birliği ile daha hızlı, daha yenilikçi işletmeler yaratma özelliği ERP II çözümlerini klasik ERP çözümlerinden daha fonksiyonel kılmıştır (Demirkan, 2005). Şekil 1.'de ERP sistemlerinin gelişim süreci gösterilmektedir.



Şekil 1. ERP Sistemlerinin Gelişim Süreci (Development Process of ERP Systems)

Çıkışı her ne kadar imalat ve üretim pazarlarından gerçekleşse de inşaat şirketleri tarafından ERP sistemleri, daha yüksek verimlilik ve etkinlik için kullanılmaktadır (Shi ve Halpin, 2003). Ahmed vd. (2003), ERP sistemlerinin inşaat firmaları tarafından müşteri ilişkilerini güçlendirmek, tedarik zinciri ortaklıklarını güçlendirmek, örgütsel esnekliği artırmak, karar verme yeterliliklerini artırmak ve proje tamamlama süresini ve masrafları azaltmak için kullanıldığını belirtmektedir. İnşaat sektörünün çok parçalı yapısı da göz önüne alındığında, ERP sistemlerinin inşaat firmalarının şantiye planlama, finansal yönetim, insan kaynakları yönetimi, müşteri ilişkileri yönetimi, depo yönetimi, tedarik ve ihale süreçlerini birleştirmek için kullanıldığı görülmektedir (Çınar ve Özorhon, 2018). Ancak Chen (2001), ERP uygulama çabalarının %20'sinin başarısızlık ile sonuçlandığını belirtmiştir. Bu nedenle, inşaat firmalarının ERP sistemlerini kullanırken yaşadıkları zorlukları ve daha başarılı uygulamalar elde edilmesi için gerekli olan başarı faktörlerini irdelemek kritik öneme sahiptir. İnşaat sektörünün yapısı ve sektör içindeki rekabetin yoğunluğu da göz önüne alındığında inşaat firmalarının sektördeki gelişmelere anında reaksiyon verebilen, süreç takibi yapabilen, üretken ve verimli bir yapıya sahip olmaları gerekmektedir. İnşaat projelerinin proje yönetiminin temel felsefesi doğrultusunda; bütçesinde, süresinde ve uygun kalitede tamamlanmaya en çok ihtiyaç duyan projeler olması da inşaat sektörünü bütünleşmiş bir yönetime en çok ihtiyaç duyan sektör haline getirmektedir (Avinal, 2012). Ayrıca, iş süreçlerinden kaynaklanan problemlerin çözümü için ERP sistemleri gibi bilişim sistemlerinin kullanımının yaygınlaştırılması firmalarda verimlilik, karlılık, esneklik ve rekabet düzeyi kriterleri açısından artış sağlamaktadır (Karabaş vd. 2017). ERP sistemlerinin inşaat firmaları tarafından kullanılması hem proje hem de kurumsal düzeyde faydalar sağlamaktadır. ERP sistemlerinin inşaat firmaları için proje seviyesindeki getireceği faydalar; her şantiye için hızlı ve kolay bir şekilde idari ve operasyonel yönetim raporlarının oluşturması, farklı coğrafi bölgelerdeki şantiyelerdeki doğru ve güncel verilere daha hızlı bir şekilde erişmek örnek olarak verilebilir. ERP sistemlerinin inşaat firmaları için kurumsal seviyesindeki getireceği faydalar ise; dijital bir know-how (kurumsal hafıza) oluşturmak, şirket için bir vizyon sağlamak, iş süreçlerinin yeniden yapılandırılması (Business Process Reengineering) nedeniyle bazı süreçlerin gözden geçirilmesi ve geliştirilmesi, kısa ve uzun vadede doğru ve güvenilir raporlar oluşturarak fizibilite çalışması performanslarını artırmak olarak sıralanabilir (Çınar ve Özorhon, 2018).

ERP sistemlerinin inşaat sektöründeki kullanımına yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Shin ve Halpin (2003), çalışmalarında inşaat firmaları kaynak planlama sistemlerinin kurulmasının önemini vurgularken, Vlachopoulou ve Manthou (2006) inceledikleri bir inşaat firması özelinde ERP uygulamalarının önemini tartışmışlardır. Voordijk vd. (2003) çalışmalarında; bilişim teknolojileri, organizasyonel değişim, bilişim teknolojisi altyapısının olgunlaştırılması gibi konu başlıklarının etkileşimlerini ve bu unsur çiftleri bazında Hollanda büyük inşaat firmalarında ERP'nin başarısına veya başarısızlığına yol açan faktörleri belirlemeye çalışmışlardır. Adam ve O'Doherty (2000) ise benzer bir çalışmayı İrlanda'daki kuruluşlarda 14 ERP uygulama projesi üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Yang vd. (2007) Tayvan'da bir yerel inşaat şirketinin ERP uygulaması sırasında sistem tedarikçilerinin seçimi üzerine çalışmışlardır. Ahmed vd. (2003) ise yüklenici firmalarda ERP sistemlerinin uygunluğunu ve uygulama durumunu araştırmışlardır. Skibniewski ve Ghosh (2009) çalışmalarında, inşaat firmaları için ERP sistem kullanımına yönelik anahtar başarı göstergelerini belirlemeye odaklanmışlardır. İnşaat firmaları için ERP sistem kullanımına yönelik anahtar başarı göstergelerini belirlemeye yönelik literatürde farklı çalışmalar da bulunmaktadır (Chung vd., 2008; Tatari ve Skibniewski, 2008; Chung vd., 2009; Tatari vd., 2011). Bu çalışmalar, yalnızca ERP sistemlerini için anahtar başarı göstergelerinin belirlenmesini amaçlamakta, uygulama aşamasında karşılaşılan sorunlar ve bu sorunların çeşitli stratejilerle nasıl çözüldüğü göz önüne alan derinlemesine analizler içermemektedir (Çınar ve Özorhon, 2018). Türk inşaat sektörünün ERP adaptasyonu ile ilgili olarak ise literatürde az sayıda kaynak bulunmaktadır. Açıkalın ve Kuruoğlu'nun (2008) çalışmaları ERP sistemlerinin Türk inşaat sektöründeki kullanım durumunu ortaya koymaktadır. Ozorhon ve Cinar (2015) ise, inşaat sektöründe kurumsal kaynak planlaması uygulamasının anahtar başarı göstergelerini Türkiye örneği üzerinden belirlemeye odaklanmışlardır. Baloğlu (2017), inşaat sektöründe bilişim sistemleri kullanımının düşük olduğunun gözlemlenmesi üzere e-Mor ürününün Türk İnşaat sektörüne katkıları analiz etmiştir. Karabaş vd. (2017) ise, ERP kullanımı ile işletme performansı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çınar ve Özhorhon (2018)

çalışmalarında Türk inşaat firmalarında ERP uygulamasının zorluklarını araştırma amacıyla, üç büyük inşaat firması ile vaka çalışması metodolojisini kullanılmıştır.

Bu arka plan göz önüne alındığında, Türk inşaat sektörünün ERP adaptasyonu ile ilgili güncel verilere dayanan çok az sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmanın ana amacı Türk inşaat sektörünün ERP adaptasyonu ile ilgili olarak Türk inşaat firmalarının ERP uygulaması sırasında karşılaştıkları zorlukları, bu zorlukların üstesinden gelmeye yardımcı olan başarı faktörlerini araştırmak ve başarılı uygulamaların gerçekleştirilebilmesi ve zorlukların aşılması için çözüm önerilerini sunmaktır.

3. İnşaat Firmalarını ERP Kullanımına İten Unsurlar ve Başarı Faktörleri (Driving Forces and Critical Success Factors in ERP Implementations)

ERP sistemleri, bütünleşik ve aynı veri tabanını kullanan ancak organizasyonun farklı departmanları için özelleştirilmiş ve son kullanıcı ara yüzleri farklı olan modüllerden oluşmaktadır. Her şirketin iş süreçlerinin ve iş yapma yöntemlerinin farklı olmasından dolayı doğal olarak kuracağı ve uygulayacağı ERP sistemi de farklı olacaktır. Bu durum her firma için oluşturulacak ERP sisteminin kendine özgü modüllerden oluşması gerektiğini göstermektedir. Bu durum her firma için ERP uygulamalarında başka başarı faktörlerinin daha öne çıkmasını sağlasa da genel olarak ERP sistemlerinin başarısı için gözetilmesi gereken temel faktörler bulunmaktadır. Gerçekleştiren literatür taraması göstermiştir ki inşaat firmalarını ERP kullanımına iten çok farklı unsurlar bulunmaktadır (Shang ve Seddon, 2000; Ahmed vd., 2003; Karataş vd., 2017; Çınar ve Özorhon, 2018). Literatür taraması sonucunda bulunan inşaat firmalarını ERP kullanımına iten unsurlar temel olarak operasyonel, yönetimsel, stratejik, bilişimsel ve organizasyonel unsurları altında Tablo 1.'de sunulmaktadır.

Tablo 1. İnşaat Firmalarını ERP Kullanımına İten Unsurlar (Driving forces of construction firms to adopt ERP implementations)

Operasyonel Unsurlar	1. Kalite geliştirme
	2. Müşteri hizmetlerinde iyileşme
	3. Tedarik zinciri ortaklıklarını güçlendirme
	4. İK bilgilerinin standardizasyonu
	5. Stoklarda optimizasyon
	6. İş süreçlerinde iyileşme
	7. Birimler arası iletişim ve koordinasyon sağlama
	8. Denetim-Şeffaflık
Yönetimsel Unsurlar	1. Kaynakların daha iyi yönetilmesi
	2. Karar verme ve planlama süreçlerinde iyileşme
	3. Performans iyileştirme
	4. Firma ile ilgili doğru ve güncel bilgilerin rapor edilmesi ve kendiliğinden yönetim raporları oluşturma (sağlıklı proje arşivlerinin oluşturulması)
	5. Farklı şantiyeler ile genel merkezlerin entegre edilmesi
	6. Proje sayısının çokluğu
Stratejik Unsurlar	1. Büyüme sağlama
	2. Kurumsallaşma sağlama
	3. Organizasyon içinde ortak vizyon oluşturma
	4. İş ortaklıklarını arttırma
	5. İş süreçlerinde yenilik sağlama
	6. Maliyet liderliği sağlama
	7. Ürün farklılaştırması ya da çeşitlenmesini sağlama
Kullanıcı ile İlgili Unsurlar	1. Organizasyonel değişimin desteklenmesi
	2. Personel güçlendirme
	3. Entegre bir çalışma ortamının yaratılması
Bilişimsel Unsurlar	1. Bilgi teknoloji kullanımında artış
	2. Otomasyonda etkinleşme

ERP uygulamasının başarısını etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Örneğin çoğu yazar çalışmalarında ERP uygulamaları ile ilgili olarak kullanıcı katılımı unsurunu önemli bir başarı faktörü olarak sıralamaktadır (Abdinnour-Helm vd., 2003; Lengnick-Hall vd., 2004). Somers ve Nelson (2001, 2004), Ferratt vd. (2006) ve Tatari vd. (2008) ise; üst yönetim desteği, proje ekibi yetkinliği, satıcı desteği, doğru yazılım paketi seçimi, yazılım konusunda kullanıcıların eğitimi, danışman desteği unsurlarını ERP uygulamasının kritik başarı faktörleri olarak nitelendirmişlerdir. ERP uygulamalarının başarıya ulaşabilmesi için ihtiyaç duyulan gereklilikler her ne kadar firma özelinde her firmanın iş süreçlerinin ve iş yapma yöntemlerinin farklı olmasından ötürü değişiklik gösterecekse de genel olarak Tablo 2'de sunulan temel başarı faktörlerini içermelidir (Botta-Genoulaz vd., 2005; Zhang vd., 2005; Finney ve Martin, 2007; Yang vd., 2007; Açıkalın vd., 2008; Chung vd., 2008; Chung vd., 2009; Tamborçevs, 2010; Ozorhon ve Cinar, 2015; Çınar ve Özorhon, 2018; Baloglu, 2019).

Tablo 2. ERP Uygulamalarında Başarı Faktörleri (Critical success factors in ERP implementations)

Organizasyon ile İlgili Faktörler	1. Amaç ve hedeflerin net olarak belirlenmesi
	2. Üst yönetimin desteği
	3. Bilgi teknolojileri altyapısı
	4. İletişim altyapısı
	5. Örgütsel değişim
	6. İş süreçlerinin yeniden yapılandırılması
Kullanıcı ile İlgili Faktörler	1. Kullanıcı katılımı
	2. Sistemi hedeflenen amaç için uygun kişinin kullanıyor olması
	3. Uygulama deneyimi
	4. Eğitim
Proje ile İlgili Faktörler	1. Proje takımı ve liderlik
	2. Danışman desteği ve danışmanlık alınan kişi/kurumun yetkinliği
Seçilen Sistem ile İlgili Faktörler	1. Sektöre uygun yazılım seçimi
	2. Çıktı kalitesi
	3. Kurulum ve kullanım kolaylığı
	4. Sonuç gösterilebilirliği
	5. Modüllerin Uyumluluğu
	6. Sistemin güvenilirliği
	7. Raporlama özelliği
	8. Veri dönüşümü ve bütünlüğü
	9. İzleme ve geri bildirim
	10. Destek süreçlerinin varlığı
	11. Fiyat, maliyet, performans oranı
	12. Mevzuat, süreç ve raporlama sistemine uygunluğu

4. İnşaat Firmalarının ERP Kullanımında Karşılaştığı Sorunlar (Obstacles Faced by Construction Firms in ERP Implementations)

İnşaat firmalarının genelinde her ne kadar ERP kullanımının faydalarına olan inanç yüksek olsa da bu sistemleri bünyelerine entegre etme aşamasında firmaların ERP sistemlerine karşı mesafeli durdukları gözlenmektedir. İnşaat firmalarının ERP kullanımında karşılaştığı sorunları kurulum aşaması ve işletme (uygulama) aşaması olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu bağlamda, inşaat firmalarının ERP kullanımında karşılaştığı sorunlara yönelik gerçekleştirilen literatür taramasının sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4'te sunulmaktadır (Ahmed vd., 2003; Yegül ve Toklu, 2004; Açıkalin vd., 2008; Tambovcevs, 2010; Karataş vd., 2017; Çınar ve Özorhon, 2018; Baloglu, 2019).

Tablo 3. İnşaat Firmalarının ERP Kullanımında Karşılaştığı Sorunlar (Obstacles Faced by Construction Firms in ERP Implementations)

Kurulum Aşamasında Karşılaşılan Sorunlar	1. Yeni sisteme karşı kurum çalışanlarının gösterdiği direnç
	2. ERP Sisteminin yönetici kademeleri tarafından desteklenmemesi
	3. Altyapı yetersizliği
	4. İnşaat sektörüne uygun olmayan ERP sistemlerinin uyarlanması
	5. Yeterli Düzeyde olmayan danışmanlık hizmet kalitesi
	6. Operasyonel iş süreçlerinin yeni sistem uyarınca değiştirilme gerekliliği
	7. Kurulum ekibinin başka işlerle de uğraşiyor oluşu
	8. Yeterince kalifiye olmayan son kullanıcı
	9. Sisteme ait dokümantasyon eksikliği
	10. Kurulum esnasında üretimin devam zorunluluğu
	11. Sistem kurulumuna ait yüksek maliyet ve bütçe oluşturmanın zorluğu
	12. Kurulum ekibi içindeki sirkülasyon
	13. Kullanılan yazılım için yurt içindeki desteğin yetersiz olması sebebiyle yurt dışından yardım alma zorunluluğu
	14. Mevcut kullanılan sistemden yeni kurulan sisteme veri aktarımının zorluğu
	15. Yazılım hataları
	16. Kuruma özel raporların oluşturulmasının zor oluşu
	17. Kurulum sürecinde kritik yönetici ve karar mercilerinin değişmesi

Tablo 4. İnşaat Firmalarının ERP Kullanımında Karşılaştığı Sorunlar (Obstacles Faced by Construction Firms in ERP Implementations)

İşletim Esnasında Karşılaşılan Sorunlar	1. Kullanıcıların yeni sisteme direnç göstermesi
	2. Personelin sisteme uyum sağlamasında karşılaşılan sorunlar
	3. Yazılım esnek olmayışı nedeniyle özelleştirmedeki zorluklar
	4. Kalifiye personel yetersizliği
	5. Yazılım hataları
	6. Kullanıcı hataları
	7. Verilerin gerçek zamanlı tutulamaması
	8. Birimler arası gerekli uyumun sağlanamaması
	9. Yazılımın yerel desteğinin yetersizliği (basamak sayısı, Türkçe karakter vb.)
	10. Altyapı yetersizlikleri
	11. Kullanıcı ara yüzlerinin karmaşıklığı
	12. Eğitim planlamasındaki zorluklara bağlı olarak eğitim eksikliği
	13. Yazılı prosedürlerin eksikliği
	14. Yönetim ve raporlama yapısının temelini oluşturacak olan kod yapısının hatalı seçilmesi.
	15. Daha önceki başarısız ERP deneyimlerinin sisteme olan inancı azaltması
	16. Seçilen kod sistemi üzerinde ekleme, çıkarma ve değişiklik yapma yetkisinin fazla sayıda ve yanlış kişilere tanınması sonucu kod yapısının bozulması
	17. "Yarım Kullanım" (sistemin sadece belli modüllerinin kullanılması veya sadece belli bölge/şantiyelerde kullanılması)
	18. Coğrafi engeller (Dünyanın farklı bölgelerinde çok sayıda inşaat alanına sahip olmak, internet bağlantısı sorunları yaşamak)

5. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Türk inşaat sektöründe ERP kullanımının faydalarına olan inancın yüksek olmasına karşı uygulamada yaşanan sorunlar nedeniyle (Demirkan, 2005; Açıklık vd., 2008) Türk inşaat firmalarının çok az bir bölümünün ERP sistemlerine başvurduğu gözleminde yola çıkarak çalışma kapsamında;

- (i) Türk inşaat firmalarının ERP uygulaması sırasında karşılaştıkları zorlukları belirlemek,
- (ii) Bu zorlukların üstesinden gelmeye yardımcı olan başarı faktörlerini araştırmak,
- (iii) Başarılı uygulamaların gerçekleştirilebilmesi ve zorlukların aşılması için gerekli çözüm önerilerini sunmak hedeflenmiştir.

Bu amaçlar doğrultusunda, ERP sistemlerini bünyesine uyarlamış 62 adet Türk inşaat firması ile bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan anket üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda katılımcılar, ikinci kısımda katılımcıların bünyesinde çalıştıkları firmalar, üçüncü kısımda ise Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini kullanımları hakkında bilgi elde etmek amacıyla sorular sorulmuştur. Üçüncü kısımda yöneltilen sorular aşağıda belirtilen hususları ölçmek amaçlı sorulmuştur:

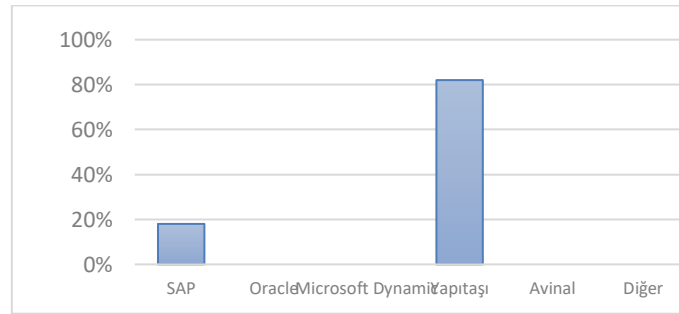
- Firmayı ERP kullanımına iten unsurlar (organizasyonu ERP sistemi edinmeye ve uygulamaya zorlayan veya zorlayan ihtiyaçlar) nelerdir?
- Firmada ERP sistemi uygulamak için kullanılan kaynaklar (sistemin uygulanması sırasında uygulama ekibi tarafından kullanılan kaynaklar: finansal, teknolojik veya insan) nelerdir?
- Firmada proje uygulama ekibinin ERP sistemi kurarken ve/veya uygularken karşılaştığı zorluklar/engeller nelerdir?
- ERP sisteminin firmanızda uygulama sürecini kolaylaştıran faktörler (etkinleştiriciler) nelerdir?
- ERP sisteminin proje ve kurumsal düzeyde uygulanmasıyla elde edilen kazanımlar (faydalar) nelerdir?

Anketin gelişim sürecinde, ilk etapta Türk inşaat firmalarında görev alan toplam 15 adet ERP sorumlusuyla yüz yüze görüşülerek bir pilot anket oluşturulmuştur. Yapılan geri dönüşler üzerinden pilot anketteki hatalar, anlaşılmasın maddeler düzeltilerek görüşmecilerden alınan geri bildirimlerle anket son haline getirilmiştir. Anket son halini aldıktan sonra, ERP sistemlerini bünyesine uyarlamış 62 adet Türk inşaat firmasında çalışan toplam 102 kişiyle e-mail, telefon ve yüz yüze görüşme yollarıyla iletişim kurularak bu kişilerden ilgili anketi doldurmaları istenmiştir. Anket, sadece inşaat firmalarında ERP sorumlusu olarak çalışan kişiler ile ERP proje yöneticilerine gönderilmiştir. Anketin gönderildiği kişilerin firmalardaki ERP sistemleri içindeki en yetkili kişiler olması yapılan anketin güvenli sonuçlar vermesini sağlamıştır. Anket gönderilen 102 kişi arasından toplam 60 kişi geri dönüş yapmıştır. Ankete geri dönüş oranı %59 olmuştur.

6. Bulgular (Findings)

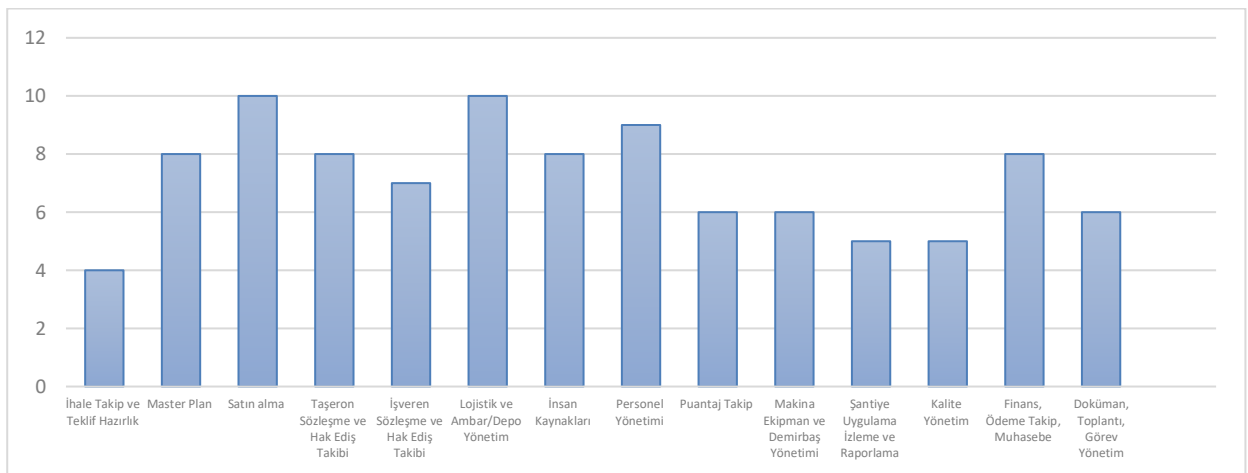
Ankete geri dönüş yapan 60 katılımcının %40'ı mühendis ve mimar, %22'si satın alma sorumlusu, %15'si finans/muhasebe sorumlusu, %6'sı IT sorumlusu olarak çalışmaktadır. Bu kişilerin ERP proje yöneticiliği görevindeki deneyimleri incelendiğinde ise %78'inin 5-15 yıl arası, %8'inin 0-5 yıl arası, %6'sının 15-25 yıl arası, %8'inin ise 25 yıl üstünde sektör deneyimi olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında anket katılımcılarının sektör içindeki deneyimlerinin yeterli seviyede olduğu söylenebilir. Ankete geri dönüş yapan 60 katılımcının çalıştıkları firmaların %60'sı orta ölçekli, %40'ı ise büyük ölçekli inşaat firmalarıdır. Firmaların; %11'i 0-5 yıl, %23'ü 5-15 yıl, %26'sı 15-25 yıl, %40'ı 25 yılın üstünde sektörde faaliyet gösteren firmalarıdır. Bu sonuçtan, kurumsallaşan inşaat firmalarının ERP sistemleriyle daha yoğun olarak ilgilendikleri çıkarılabilmektedir. Firmaların %63'ü sadece yurt içinde projeler yaparken, %27'si yurt dışında da projeleri olan inşaat firmalarıdır. Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini kullanımına yönelik değerlendirme sorularının analizi yapıldığında ise aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

- **Türk inşaat sektöründe kullanılan ERP sistemleri:** Başlıca ERP sistemlerinden olan SAP, Oracle, Microsoft Dynamics, Yapıtaşı ERP inşaat yönetim sistemi gibi sistemler içinden Yapıtaşı ERP sisteminin Türk inşaat firmaları tarafından kullanım oranı %82, SAP sisteminin ise kullanım oranı ise %18'dir. Yapıtaşı sisteminin kullanımının fazla çıkmasının sebebinin, Yapıtaşı ERP sisteminin diğer yazılım ve çözümlerine oranla daha az yatırım gerektiren bir program olması olduğu düşünülmektedir. Keza yüksek yatırım gerektiren SAP programının kullanımı için gerekli olan kurumsallaşma eksikliği de Türk inşaat sektöründe SAP kullanım oranını düşürmektedir.



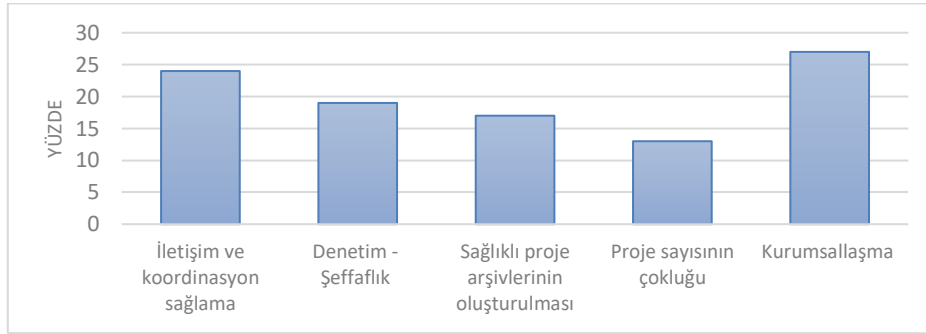
Şekil 2. Türk İnşaat Sektöründe Kullanılan ERP Sistemleri (ERP Systems Used in The Turkish Construction Industry)

- **Türk inşaat firmalarının tercih ettikleri ERP sistemlerinin kapsamı:** ERP sistemleri firmalar tarafından planlama süreçlerinin yönetimi, satın alma takip, taşeron ve işveren sözleşme ve hak ediş takibi, depo takibi ve lojistik takibi, insan kaynakları, personel yönetimi, puantaj takip, makina ekipman ve demirbaş yönetimi, insan kaynakları ve personel yönetimi, kalite yönetimi, ödemelerin takibi ve muhasebe süreçlerinin yönetimi, şantiye uygulama izleme ve raporlama süreçlerinin yönetimi ve doküman yönetimi amacıyla kullanılabilir. Araştırma sonuçlarına göre, Türk inşaat firmaları ERP sistemlerini yoğunlukla satın alma yönetimi (%10), depo ve lojistik takibi (%10), personel yönetimi (%9) ve yönetim muhasebesinde (%8) kullanmak için bünyelerine entegre etmektedirler.



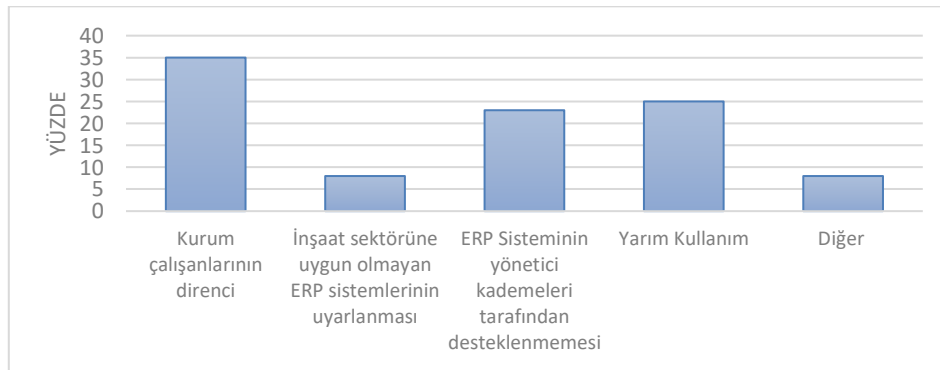
Şekil 3. ERP Sistemlerinin Kapsamları (Scope of ERP Systems)

- **Türk inşaat firmalarının ERP kullanımına iten unsurlar:** Firmalar kurumsallaşma aşamasını kolaylaştıracağı beklentisiyle ERP sistemlerini birer kurumsallaşma basamağı olarak kullanmaktadırlar. Kurumsallaşmanın sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi beklentisinin yanında birimler arası iletişim ve koordinasyon sağlama %21, firma bünyesinde denetimin ve şeffaflığın sağlanması %19, proje arşivlerinin oluşturulması beklentisi %17 payla en önemli beklentiler arasında yer almaktadır.



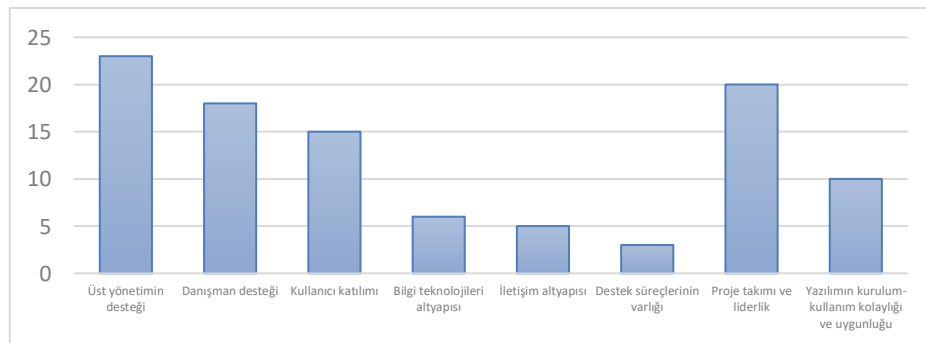
Şekil 4. ERP Kullanımına İten Unsurlar (Driving Factors of ERP Use)

- **Türk inşaat firmalarının ERP kullanımında karşılaştıkları zorluklar:** Araştırma sonuçlarına göre, kullanıcıların sistemi kullanma konusundaki direnci (%35) en önemli sorun olarak belirlenmiştir. Katılımcılar tarafından önemli bulunan bir diğer zorluk ise, ERP sisteminin sadece belli modüllerinin veya sadece belli bölge veya şantiyelerde kullanılması yani Yarım Kullanımdır (%25). Katılımcılar aynı zamanda uyarılma çalışmalarına başladıkları ERP sistemlerinin firma içerisinde belli kişi veya departmanların talebi üzerine temin edilmesi ve bu sebepten dolayı yeterli desteğin sağlanamamasından endişe ettiklerini belirtmişlerdir. Bu kriterin önem yüzdesi ise %23 olarak bulunmuştur. İnşaat sektörüne uygun olmayan bir ERP sisteminin seçilmiş olması (%8) bir diğer önemli zorluk faktörü olarak belirlenmiştir.



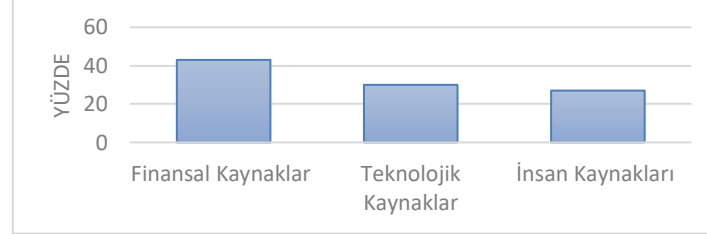
Şekil 5. ERP kullanımında Karşılaştıkları Zorluklar (Obstacles in ERP Use)

- **Türk inşaat firmalarının ERP kullanım sürecini kolaylaştıran faktörler:** Türk inşaat firmalarının ERP kullanım sürecini kolaylaştıran en önemli faktörler üst yönetimin desteği (%23), proje takımı ve liderlik (%20), danışman desteği (%18) ve kullanıcı katılımı (%15) olarak bulunmuştur.



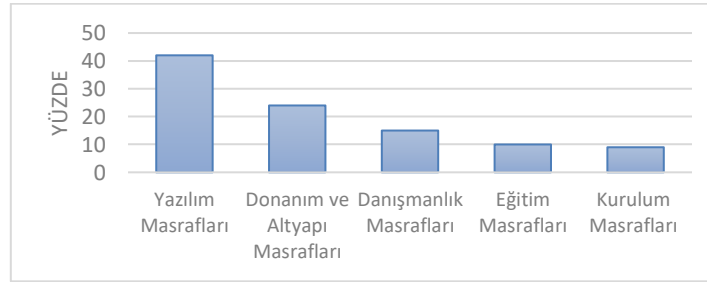
Şekil 6. ERP Kullanım Sürecini Kolaylaştırıcı Faktörler (Facilitating Factors of ERP Use)

- **Türk inşaat firmalarının ERP sistemi uygulamak için kullanılan kaynaklar:** İnşaat firmalarının ERP sistemi kurulumu ve işletilmesi sırasında kullandıkları en önemli kaynak, finansal kaynaklar olarak belirlenmiştir. Bahsedilen finansal kaynaklar çalışanların firmada kurulan ERP sistemini öğrenmesi için gerekli eğitim masrafları, sistemi kuracak kişilerin ücreti, danışman ücreti gibi kalemlerden oluşacağında bir yatırım gerektirmektedir. Bu bağlamda anket katılımcılarına ERP sisteminin firmalarında uygulanması için yapılmış olan yatırımın maliyeti ayrı bir soru olarak sorulmuştur. Ancak, katılımcılar firmalarının gizlilik sebeplerinden dolayı yatırım tutarlarını belirtmemişlerdir.



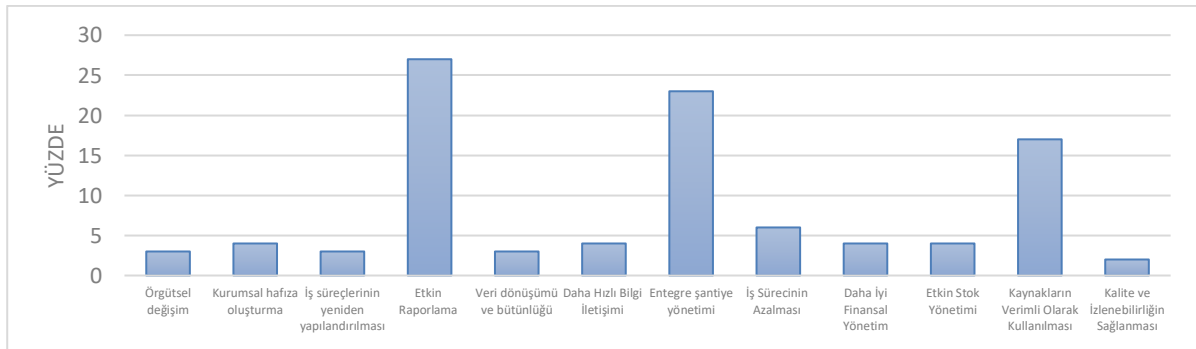
Şekil 7. ERP Sistemi Uygulamak İçin Kullanılan Kaynaklar (Resources Used to Implement ERP System)

- **Türk inşaat firmalarının ERP sistemi uygulamak için kullandıkları finansal kaynakların dağılımı:** Firmaların ERP masraflarının dağılımı %42 ile yazılım, %24 donanım, %15 danışmanlık, %10 eğitim ve %9 kurulum masrafları şeklinde sıralanmaktadır.



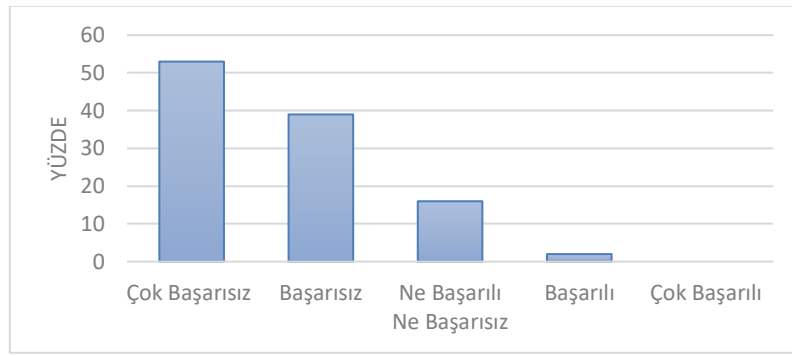
Şekil 8. Finansal Kaynakların Dağılımı (Distribution of Financial Resources)

- **Türk inşaat firmalarının ERP sistemi uygulamalarından kazanımları:** Firmaların %54'ü etkin raporlama, %46'sı ise entegre şantiye yönetimini, %34'ü ise kaynakların verimli olarak kullanılmasını ERP sistemlerinin getirdiği en önemli faydalar olarak görmektedir. Kalite ve izlenebilirliğin sağlanması hususu ise firmaların ERP sistemi uygulamalarından kazanımları açısından %2'lik bir pay ile en az öneme sahip kazanım olmuştur.



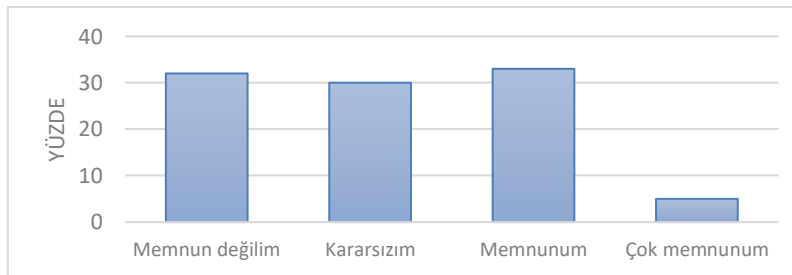
Şekil 9. Firmalarının ERP Sistemi Uygulamalarından Kazanımları (Acquisition of Firms from ERP Use)

- **ERP sistemlerine yapılan yatırımların geri dönüşü:** ERP sistemi gibi büyük teknolojik yatırımlar yapılmadan önce yatırımın iş değerini ölçmeye yönelik olarak yatırımın geri dönüşünün belirlenmelidir (Yegül ve Toklu, 2004). Bu nedenle çalışma kapsamında firmalardan, ERP kullanımlarının firmalara sağladığı katkıları, bu sistemleri kurmak için üstlendikleri yatırım miktarını da gözeterek değerlendirmeleri istenmiştir. Katılımcıların %82'si firmanın üstlendiği ERP yatırım maliyeti ile sistemden elde edilen başarı arasında bir ilişki olmadığı hususunda görüş belirtmiştir.



Şekil 10. ERP Yatırımlarının Geri Dönüşü (Return on ERP Investment)

- **ERP sisteminin başarısıyla kullanım süreleri arasındaki ilişki:** ERP kullanımının firmaya sağladığı katkı ile bu sistemi kurmak için üstlenilen yatırım miktarı arasındaki ilişkiyi çok başarısız ve başarısız olarak tanımlayan firmaların neredeyse tamamının üç sene veya daha az süre sistemlerini kullanmış oldukları görülmektedir. Bu firmaların ERP sistemlerinden yeteri kadar verim alamamış olmalarının en büyük sebebi; sistemi iyileştirecek ve firma bünyesinde benimsetecek kadar uzun süre sistemi kullanmış olmamalarıdır.
- **Firmaların ERP sistemlerinden memnuniyet düzeyleri:** Araştırma sonuçlarına göre; %32 memnun değilim, %30 kararsızım, %33 memnunum ve %5 çok memnunum cevabı çıkmıştır. Bu sonuca göre, Türk inşaat firmalarının üçe birlik kısmının henüz ERP sisteminden beledikleri sonucu alamadığı görülmektedir. Bu durum ise, bu firmaların büyük oranda ERP sistemlerine geçiş aşamasında olan ya da yatırımın geri ödeme süresini tamamlamamış olan firmalar olduğu şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 11. ERP Sistemlerinden Memnuniyet Düzeyi (Satisfaction Level with ERP Systems)

7. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Analiz sonuçları göstermektedir ki Türk İnşaat firmalarını ERP kullanımına iten en önemli unsurlar; satın alma yönetimi, depo ve lojistik takibi, personel yönetimi ve yönetim muhasebesinde kullanmak için bünyelerine entegre etme arzusudur. Bu bulgular, Tablo 1 ile ilişkilendirildiğinde; Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini stratejik, bilişimsel ya da organizasyonel unsurlardan ziyade yoğunlukla operasyonel ve yönetsel unsurlar açısından kullanma arzusu içerisinde olduğunu göstermektedir. İnşaat firmalarında denetlenebilir ve sistematik büyüeyebilen yapıların kurulması ve sonraki nesillere devredilebilmesi için ERP sistemleri gibi entegre iş uygulamalarının bir yönetim stratejisi olarak uygulanması gerekir. Bu bağlamda, artan küreselleşme, teknolojik gelişmeler, müşteri beklentilerindeki değişiklikler vb. hususlara bağlı olarak inşaat sektöründe artan rekabet düzeyi de düşünülüğünde inşaat firmalarının rekabet avantajlarını koruyabilmeleri veya arttırabilmeleri için ERP gibi sistemleri operasyonel düzeyden daha çok stratejik düzeyde de kullanma eğiliminde olmalıdırlar. Çünkü böylece, iş süreçlerinde verimlilik sağlanarak organizasyonun ve personelin güçlenmesi ve firma başarısının artması sağlanabilecektir. Bu nedenle Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini sadece bilgi yönetimini kolaylaştıracak sistemler olarak değil stratejik performans yönetimi için bir gereklilik olarak ele alarak ilgili sistemlerin entegre edilmesi için gerekli altyapıyı oluşturmaları gerekmektedir.

Analiz sonuçlarına göre Türk İnşaat firmalarının ERP kullanımında karşılaştığı en önemli sorunlar; kullanıcıların sistemi kullanmama konusundaki dirençleri, ERP sistemlerinin firma içerisinde adaptasyonu sürecinde yeterli desteğin sağlanamaması ve firmaların seçtikleri ERP sistemlerinin sadece belli modüllerinin kullanılması veya sadece belli bölge/şantiyelerde kullanılmasıdır. Anket sonuçlarına göre sistemin faaliyete geçmesi için yüzde yüz hazır veya uygun hale gelmesi beklentisi de önemli bir sorun başlığı olarak ortaya çıkmıştır. Bu bulgular, Tablo 2

ile ilişkilendirildiğinde görülmektedir ki; Türk inşaat firmalarının ERP uygulamalarında karşılaştıkları temel sorunlardan olan sistemin firma bünyesine adaptasyonu sürecinde karşılaşılan destek eksikliği, sistemin yarım kullanımı, kullanıcı direnci ve sistemin faaliyete geçmesi için yüzde yüz hazır veya uygun hale gelmesi beklentisi gibi sorunlar ERP uygulamalarında başarı sağlamak için gerekli olan organizasyon ve seçilen sistem ile ilgili olan başarı faktörlerinin eksikliği ile ilgilidir. Bulgular Tablo 3 ile ilişkilendirildiğinde; Türk inşaat firmaları ERP sistemleri ile ilgili olarak bu sistemlerin işletimi süreçlerinden daha çok kurulum ve adaptasyon süreçlerinde sorunlar yaşamaktadırlar. Yine anket sonuçlarından elde edilen bulgular ışında Türk inşaat firmalarının işletim süreçlerinde daha az sorunla karşılaşılıyor olmalarının en önemli sebebinin firmaların neredeyse tamamının üç sene veya daha az süre zarfında ERP sistemlerini kullanıyor olması olarak gösterilebilir.

İnşaat firmalarında ERP kullanımının başarısını arttırmak için en öncelikli gereklilik, söz konusu ülkenin inşaat sektörünün özelliklerine uygun ERP sistemlerinin uyarlanmasıdır. Keza, seçilen ERP sisteminin inşaat sektörüyle uyumlu bir ürün olmamasının, bu konuyla ilgili önceden Türkiye’de yapılan araştırmalar incelendiğinde de en önemli ERP kullanım sorunlarından birini oluşturmakta olduğu görülmektedir (Sarşar ve Işıkdag, 2004). İnşaat şirketleri doğru bir araştırma yöntemiyle en uygun sistemi belirleyebildiği gibi bazen inşaat sektörüyle tümüyle ilgisiz, yönetim konusunda faydalı olmaktan çok, tam tersine aksamalara sebep olabilecek sistemleri temin etme yoluna gidebilmektedirler. Bugün Türkiye’de kullanımı başarıyla sürdürülen ERP sistemleri incelendiği zaman ortaya açıkça çıkan gerçeklerden en önemlisi, inşaat sektörü için özelleştirilmiş olan sistemlerin başarılı olurken, diğer sektörlerin kullanıma yönelik olarak hazırlanmış sistemlerin genellikle hem başarısız olduğu hem de bu başarısızlık sebebiyle firmaların almış oldukları “modern yönetim sistemi” temini kararlarından vazgeçip güvenlerinin sarsılmasına sebep olmalarına sebep olduğudur. Bu nedenle başka sektörlerde kullanılan ERP sistemlerinin uyarlanması kararından ziyade inşaat sektörüne uyumlu bir ERP sisteminin seçilmesine özen gösterilmelidir. Seçilen ERP sisteminin inşaat sektörüne uyumlu olmaması bazen yerel faktörler sebebiyle de ortaya çıkabilmektedir. Başka ülkelerin inşaat sektörlerinde başarılı bir şekilde kullanılabilen ERP sistemleri bazı ülkelerin yerel şartları sebebiyle uyumsuz kalabilmektedirler. Böyle durumlarda uluslararası çalışan firmaların, farklı destek yazılımlarından destek alması bir çözüm olabilmektedir veya ERP sistemini geliştiren firma aracılığıyla sorun yaşanan modülleri modifiye edilmesinin sağlanması tercih edilebilmektedir (Chadhar ve Rahmati, 2004).

Türk inşaat firmalarında ERP kullanımının başarısını arttırmak için önemli bir konu başlığı ise ERP sisteminin yönetici kademeleri tarafından desteklenmesidir. ERP sistemlerinin temin edildikten sonra uyarlanmaları ve firma dinamiklerine oturtulması süre ve zahmet isteyen işlerdir. Bu tür geçiş projelerinin başarılı olabilmesi için, proje grupları oluşturulmalı ve bütün departmanlarca desteklenmelerinin sağlanabilmesi için yönetimin desteğini de almalıdır (Zhang vd., 2005). Bazı inşaat firmalarında ERP alımına karar verildikten sonra projeye ilgilenen yöneticinin başka bölgelere veya başka görevlere atanması, geçiş sürecinin aşırı uzaması ve buna bağlı olarak firmayı ERP sisteminden vazgeçilmesi sonucuna götürebilmektedir. Bir ERP projesinin hayata geçirilmesi için ihtiyaç duyulan süre genel bir ortalama ile altı ay ile bir yıl arasında kabul edilebilir. Bu nedenle, eğer mümkünse ERP sorumlusunun sistemin kullanıma geçmesinden en az altı ay kadar sonrasına kadar istihdam edilmeye devam edilmesi önerilmektedir. Bir diğer önemli konu ise, ERP proje ekiplerinin birden fazla sorumlu kişi aracılığıyla yönetilmemesidir. Çünkü böyle bir durumda, kararların birden çok kişinin onayından geçmesi zorunluluğu ve önceden alınmış kararların başka bir sorumlu tarafından bozulmasına izin verilmesi sürecin uzamasına ve kullanıma geçiş aşamasının gecikmesine sebep olmaktadır. ERP sorumlularından birisi onay akışlarının en hızlı haliyle işletilmesi için kısa bir akış tasarlarlarken, eş yetkiye sahip başka bir sistem sorumlusunun denetimi daha sıkı hale getirmek amacıyla daha karmaşık bir akış dizisinde ısrar etmesi, hem projenin söz konusu süreciyle ilgili uyarılmanın gecikmesini sağlayacaktır, hem de bu çatışmanın yaşandığı günden itibaren sık sık geriye dönülüp yeni revizyonlar yapılmasına neden olacaktır. Bu noktada getirilecek temel kural ERP proje ekiplerinin birden fazla sorumlu kişi aracılığıyla yönetilmemesi, projenin en başında gerekiyorsa yönetimin de katılacağı genel bir toplantıyla ERP sorumlusunun yetki ve sorumlulukları tüm firma çalışanlarına tanımlanmasıdır.

Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini adaptasyonu sırasında sıklıkla karşılaşılan bir durum ise uyarılma sürecinin fazla uzamasına bağlı olarak kullanıcıların ve hatta bazı durumlarda yönetimin sisteme olan güveninin azalmasıdır. İnşaat projelerine uyumlaştırılmaya çalışılan bir ERP sürecinin adaptasyonun seçilmesi durumunda, özellikle yabancı ERP standartlarının Türk firmalarına uyarlanması sırasında resmi muhasebe modüllerinin de sisteme dahil edilmeye çalışılması, geçtiğimiz yıllarda birçok ERP projesinin başarısızlıkla sonuçlanmasına sebep olmuştur. Bu nedenle, proje başlangıcında firmanın ilgili bütün departmanlarının katılımıyla gerçekleştirilecek toplantıda, bir firmaya %100 uyum sağlayan bir sistemin asla var olamayacağı belirtilmesi, ilerleyen süreçlerde tam olarak uyum sağlanamadan kullanıma geçilebileceğinin ifade edilmesi faydalı olacaktır. Bazı durumlarda sistemin firmaya uyum sağlamasından ziyade firmanın sisteme uyum sağlaması gerekecektir. Özellikle kurumsal yapıya sahip olmayan firmaların departmanlaşmak zorunda kalmaları, şantiyelerinde geleneksel sistemlerle çalışmalarını sürdüren firmaların, şantiye organizasyon şemaları oluşturmaları firmayla seçilen sistemin uyumunu sağlayacak önemli hususlardır.

ERP sistemlerinin inşaat firmalarındaki başarısını azaltan bir diğer etken ise, başarısız ERP deneyimlerinin sisteme olan inancı azaltmasıdır. Bu nedenle, eğer daha önceden başarısız bir ERP deneyimi yaşamış bir firmaya uyarılma yapılmaya çalışılıyorsa öncelikle proje başlangıcında firma bazında genel bir toplantı yapıp sistemin kapsamı, süreç ve iş programı gibi konularda bilgi verilirken yeni sistemin eskiden başarısız olan sistemle arasından farklılıkların da altının çizilmesi faydalı olacaktır. Özellikle yeni sistemin başarılı referanslarından örnekler verilmesi, sistemin demosunun veya basit versiyonunun firma çalışanlarına tanıtılması, sistemin uygulanmasının kolay olduğunun altının çizilmesi oldukça önemli önlemler olacaktır. Özellikle daha önce başından başarısız bir ERP deneyimi geçmiş olan firmalar, daha sonra başka bir sistemi denemek istediklerinde, duruma önceki deneyimleri doğrultusunda daha mesafeli yaklaşıp sistemi öncelikle bazı projeler sınırında veya sadece belli modülleri kullanarak denemeye almayı tercih etmektedirler. Ancak ERP sisteminin firma içinde kullanımına tam olarak geçilmemesi önemli bir başka sorundur.

ERP sistemlerinin inşaat firmalarındaki başarısını azaltan en önemli unsur olan kullanıcı direncinin azaltılması içinse öncelikli olarak yönetimin desteğinin sağlanması gerekmektedir. Çünkü yönetimin yeteri kadar destek vermediği bir ortamda, sistemin kullanılmasına direnen kullanıcıların amaçlarında başarılı olmaları çok daha kolay olacaktır. Kullanıcı direncini azaltmak için; uyarılma ve eğitim süreçlerinin tamamlanıp test kullanımına geçilmesi aşamasında yazılım firması, ERP Proje ekibi ve yönetimden temsilcilerle bir toplantı yapılması, bu toplantıda bir tarih belirlenip bu tarihten sonra firmanın ERP kapsamı altındaki bütün faaliyetlerinin ERP sistemi aracılığıyla yürütülmesine karar verildiğinin duyurulması en uygun ve etkili yöntem olacaktır. Kullanıcı direncinin kırmanın bir diğer yolu ise sistemi olumlu olarak kullanan ve katkıda bulunan kullanıcılara birer eğitim sertifikası vermesi olacaktır. Keza, kullanıcıların teşvik edilmesi hususu başarılı bir ERP sistemi için gerekli görülen temel önermelerden birisidir (Chung vd., 2008) ve eğitim sertifikaları gibi araçlarda kullanıcıların sistem kullanımlarını arttıracak önemli teşvik araçlarından biridir. Kullanıcı direncinin azaltılmasında etkili olacak bir diğer unsur ise kullanıcı katılımının sağlanmasıdır. Çünkü ERP sistemlerinin firmalara adaptasyonu sırasında yaşanan geçiş dönemi, eski ve yeni çalışma sistemleri arasındaki farklarla başa çıkılmaları gereken kullanıcıların işleri üzerindeki kontrol algılarına yönelik bir tehdit oluşturmaktadır. Kullanıcının proje planına tam katılımı sağlanarak bu algının kırılması mümkündür (Zhang vd., 2005).

İnşaat firmalarının ERP sistemlerinin kullanımı sırasında başarı elde edebilmesi için dikkat etmeleri gereken bir diğer husus ise, kod kullanımı ile alakalıdır (Yang vd., 2007). Diğer sektörlerde sadece kaynakları temsile edecek bir kaynak kod sistemi geliştirilmesi yeterli olabilmekteyken inşaat sektöründe kaynakların birer kodla ifade edilmesi haricinde, kaynakların hangi iş veya hesap kodlarında kullanıldığını ifade edecek ayrı bir kod yapısında da ihtiyaç duyulmaktadır. İnşaat firmaları, bünyelerine adapte edecekleri ERP sistemleri kapsamında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan kodları kullanabilecekleri gibi kendilerinin geliştirdikleri tamamen farklı bir kod yapısını da kullanmayı tercih edebilmektedirler. Bu hususta rastlanan önemli sorunlardan birisi firmaların daha önce kullanmakta oldukları kod yapılarını ısrarla ERP sistemine entegre etmeye çalışmasıdır. Normal şartlarda bütün firma çalışanlarının aşına olduğu bu kod yapılarının firmanın alışkanlıklarının korunması adına sisteme faydası oldukça büyüktür. Ancak, bu kod yapılarında yıllar içerisinde farklı departmanlar ve personel tarafından yeni maddelerin eklenmesi veya yenilenmesiyle bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, önceden kullanılan kod yapısının yeni ERP sisteminde de kullanılması için ısrar edilmesi, kullanıma geçildikten sonra sistemin genelinin etkisizleşmesine sebep olabilmektedir. Bu durumun önüne geçilebilmesi için ise; müdahale yetkisinin sadece belirli kişilere verilerek kod yapılarının bu kişiler tarafından aylık veya üç aylık periyotlarda kontrol edilerek onarılması önerilmektedir. Ulaşılması gereken ana yapı, ERP sistemi içerisinde herhangi bir kaynağın birbirinden bağımsız çalışan üç ayrı kod yapısıyla (kaynak kodu- aktivite kodu ve mahal kodu) ifade edilmesi olmalıdır. Bu yapıların haricinde her proje için ayrı bir kod atanması gerekeceği için proje kodlarının dördüncü kod yapısı olarak sayılması da mümkündür. Her ERP sisteminde kullanılması zorunlu olmamakla beraber kullanılmakta olan muhasebe takip sisteminin kayıtlarıyla karşılaştırma yapılabilmesi veya doğrudan veri entegrasyonunun sağlanabilmesi amacıyla bu kod yapılarının yanına muhasebe kodlarının eklenmesi de önerilebilir.

ERP sistemlerinin kurulumu ile işletimi sırasında da inşaat firmalarının başarı yakalayabilmesi için seçilen sistemle ilgili birtakım özelliklere de dikkat edilmesi önerilmektedir. Özellikle yurtdışı inşaat proje sayısı daha fazla olan inşaat firmalarının sistem seçimlerinde gerektiğinde Türkçe, İngilizce, Rusça, Arapça gibi dilleri destekleyen sistemleri seçmeleri önerilmektedir. Bu sayede yabancı dil seviyesi diğer sektörlerde göre daha zayıf olan inşaat sektörü çalışanları için daha kolay kullanım şartları yaratılabilecektir. Aynı şekilde ERP sistemlerinin daha kullanıcı dostu hale getirilmesi de inşaat sektörü çalışanları için daha kolay kullanım şartları yaratılabilecektir.

İnşaat firmalarının rekabet avantajlarını arttırmak için uygulaması gereken önemli bir yönetim sistemi olarak kabul edilmesine karşın ERP sistemlerinin Türk inşaat sektöründe yaygınlığının ve uygulama başarısının düşük olduğu gözlenmektedir. Türk inşaat firmalarının ERP sistemleri ile ilgili tecrübeleri incelenerek, inşaat

firmalarının ERP sistemlerini kullanma amaçlarını ve karşılaştıkları zorlukları araştıran bu çalışma kapsamında, Türk inşaat firmalarının ERP sistemlerini yoğunlukla operasyonel ve yönetsel unsurlar açısından kullanma arzusu içerisinde olduğu görülmüştür. Türk İnşaat firmalarının ERP kullanımında karşılaştığı en önemli sorunlar; kullanıcı direnci ile yönetimin desteğinin eksikliğidir. Özellikle bu iki faktörün literatürde ERP sistemlerini başarısızlığa götüren en önemli faktörler arasında olduğu düşünüldüğünde de bu hususlara ilişkin alınacak önlemlerin sıralanması ERP sistemlerini uygulamak isteyen inşaat firmaları için faydalı olacaktır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında ERP sistemlerini uygulamak isteyen inşaat firmalarının kendilerine uygun bir yol haritası hazırlaması için gerekli altyapıyı sağlaması aşamasında faydalı olacağı düşünülen çözüm önerileri de paylaşılmıştır. Çalışma bulgularına yönelik geliştirilen çözüm önerileri, firmaların stratejik performans yönetimi için veri oluşturacak olması açısından özel bir önem teşkil etmektedir. Ayrıca, çalışmanın bulguları inşaat firmalarının üst düzey yöneticilerini ve ERP danışmanlarını inşaat sektöründe ERP sistemlerini etkin bir şekilde uygulamak için yönlendirmede yardımcı olabilir. Bu hususlar ise, çalışmanın sektörel katkıları oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan literatür taraması göstermektedir ki, Türk inşaat sektöründe ERP sistemlerinin uygulanması ile ilgili çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. ERP sistemlerinin Türk inşaat sektöründeki mevcut kullanım durumunu analiz eden bu çalışmalar ise ya güncelliğini yitirmiş ya da bazı firmaların ERP deneyimlerini sunan vaka çalışmaları niteliğindedir. Bu bağlamda Türk inşaat sektöründe ERP sistemlerinin kullanımını incelenen bu çalışma, güncel veriye dayalı olması ve tek firma deneyiminden ziyade daha bütüncül bir bakış açısıyla sektörün geneline odaklanması anlamında literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. İnşaat firmalarında ERP kullanımının başarısını arttırmak için söz konusu ülkenin inşaat sektörünün özelliklerine uygun ERP sistemlerinin uyarlanması en öncelikli gereklilik olduğu düşünüldüğünde Türk inşaat firmalarının ilgili ERP seçimlerini yaparken göz önüne almaları gereken bu kriterlerin Türk inşaat sektörü açısından önem derecesinin bulunması gibi çalışmaların ilerleyen çalışmalar kapsamında yapılmasının anlamlı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazar, verilerin temin edilmesi aşamasında katkılarından ötürü Cem Ayyıldız ve Mehmet Alperen'e teşekkürlerini sunmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Abdinnour-Helm, S., Lengnick-Hall, M. L., Lengnick-Hall, C. A., 2003, Pre-implementation attitudes and organizational readiness for implementing an enterprise resource planning system, *European journal of operational research*, 146(2), 258-273.
- Açıklan, U., Kuruoğlu, M., Işıkdag, Ü., 2008, Kurumsal Kaynak Planlama Sistemleri ve İnşaat Sektöründe Kullanımı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 451, 27-31.
- Adam, F., O'Doherty, P., 2000, Lessons from enterprise resource planning implementations in Ireland - towards smaller and shorter ERP projects, *Journal of Information Technology*, 15, 305-316.
- Ahmed, S. M., Ahmad, I., Azhar, S., Mallikarjuna, S., 2003, Implementation of enterprise resource planning (ERP) systems in the construction industry, *Construction Research Congress: Wind of Change: Integration and Innovation*, 1, 1-8.
- Avinal, A., İnşaat Proje Yönetimi ERP Sistem Seçimlerinde, Sorgulanması Gerekenler ve Olması Gereken Yapı, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir, 421- 431, 13-16 Eylül 2012.
- Baloglu, A. 2017. İnşaat Sanayisinde ERP Kullanıma yönelik Araştırma ve Vaka Çalışması. <https://ab.org.tr/ab13/bildiri/31.pdf>
- Bingi, P., Maneesh K. S., Jayanth K. G., 1999, Critical issues affecting an ERP implementation, *IS Management*, 16(3), 7-14.
- Botta-Genoulaz, V., Millet, P.A., Grabot, B., 2005, A survey on the recent research literature on ERP systems, *Computers in industry*, 56(6), 510-522.
- Chadhar, M.A., Rahmati, N., 2004, Impact of national culture on ERP systems success. *Second Australian Undergraduate Students, Computing Conference, Melbourne*, 23-31.
- Chen, I. C. 2001, Planning for ERP systems: analysis and future trend business, *Process Management Journal*, 7(5), 374-386.
- Chung, B. Y., Skibniewski, M.J., Lucas Jr, H.C., Kwak, Y.H., 2008, Analyzing enterprise resource planning system implementation success factors in the engineering-construction industry, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(6), 373-382.
- Chung, B., Skibniewski, M.J., Kwak, Y. H., 2009, Developing ERP systems success model for the construction industry, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(3), 207-216.
- Çınar, E., Ozorhon, B. 2018. Enterprise resource planning implementation in construction: Challenges and key enablers, *Journal of Construction Engineering*, 1(2), 75-84.
- Davenport, T. H. 1998, Putting the enterprise into the enterprise system, *Harvard Business Review*, 76(4), 121-131.
- Demirkan, Ç., 2005, Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Sistemlerinin İnşaat Sektöründe Uygulanabilirlik Araştırması, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ferratt, T.W., Ahire, S., De, P. 2006, Achieving success in large projects: implications from a study of ERP implementations, *Interfaces*, 36(5), 458-469.

- Finney, S., Martin, C., 2007, ERP implementation: a compilation and analysis of critical success factors, *Business Process Management Journal*, 13(3), 329-347.
- Karabaş S., Uysal, D., Karkacier, O., 2017, Kurumsal Kaynak Planlamasının İşletme Performansı Üzerine Etkisi: Bir Alan Araştırması, *Yalova Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(13), 129-145.
- Klaus, K., Rosemann, M., Gable, G. G., 2000, What is ERP?", *Information Systems Frontiers*, 2(2), 141-162.
- Lengnick-Hall, C., Lengnick-Hall, M., Abdounour-Helm, S. 2004, The role of social and intellectual capital in achieving competitive advantage through enterprise resource planning (ERP) systems, *Journal of Engineering and Technology Management*, 21(4), 307-330.
- Ozorhon, B., Cinar, E., 2015, Critical success factors of enterprise resource planning implementation in construction: Case of Turkey, *Journal of Management in Engineering*, 31(6), 04015014.
- Sarshar M., Isikdag U., 2004, A survey of ICT use in the Turkish construction industry, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11(4), 238-247.
- Shang, S., Seddon, P.B., 2000, A comprehensive framework for classifying the benefits of ERP systems, *Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*, Peru, 1005- 1014.
- Shi, J.J., Halpin, D.W., 2003, Enterprise resource planning for construction business management, *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(2), 214-221.
- Skibniewski, M.J., Ghosh, S. 2009, Determination of key performance indicators with enterprise resource planning systems in engineering construction firms, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(10), 965-978.
- Somers, T.M., Nelson, K. 2001, The impact of critical success factors across the stages of enterprise resource planning implementations, *IEEE Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Science*, Washington, DC, USA.
- Somers, T.M., Nelson, K.G.A 2004, Taxonomy of players and activities across the ERP project life cycle, *Information and Management*, 41(3), 257-278.
- Tambovcevs, A., 2010, ERP system implementation: A case study of the construction enterprise, *Economics & Management*, 15, 1092-1098.
- Tatari, O., Castro-Lacouture, D., Skibniewski, M.J., 2008, Performance Evaluation of Construction Enterprise Resource Planning Systems, *Journal of Management in Engineering*, 24(4), 198-206.
- Tatari, O., Skibniewski, M. J. 2011, Empirical analysis of construction enterprise information systems: assessing system integration, critical factors, and benefits, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(5), 347-356.
- Vlachopoulou, M., Manthou, V., 2006, Enterprise resource planning (ERP) in a construction company, *International Journal of Business Information Systems*, 1(3), 339-351.
- Voordijk, H., Van Leuven, A., Laan, A., 2003, Enterprise resource planning in a large construction firm: implementation analysis, *Construction management and economics*, 21(5), 511-521.
- Yang, J. B., Wu, C. T., Tsai, C. H., 2007, Selection of an ERP system for a construction firm in Taiwan: A case study, *Automation in construction*, 16(6), 787-796.
- Yegül, M. F., Toklu, B. 2004. Türkiye'de ERP Uygulamaları. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 1, 33-36.
- Zhang, Z., Lee, M.K., Huang, P., Zhang, L., Huang, X. 2005. A framework of ERP systems implementation success in China: An empirical study." *International Journal of Production Economics*, 98(1), 56-80.



INVESTIGATION OF HEAVY METAL CONTENT IN BEACH SEDIMENTS ON THE OF TASUCU BAY (MERSİN) WITH GEOCHEMICAL AND MULTIVARIATE STATISTICAL APPROACHES

Fusun YALCIN^{1*}, Muthuswamy Ponniah JONATHAN², Mustafa Gurhan YALCIN³, Semiha ILHAN⁴, Yasemin LEVENTELİ⁵

¹ Akdeniz University, Faculty of Science, Department of Mathematics, Antalya, Turkey

² Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra y Materiales, Hidalgo, México

³ Akdeniz University, Faculty of Engineering, Department of Geology Engineering, , Antalya, Turkey

⁴ General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Ankara, Turkey

⁵ Akdeniz University, Faculty of Engineering, Department of Geology Engineering , Antalya, Turkey

Keywords

*Heavy Metals,
Multivariate Statistical
Analysis,
Data Analysis,
Factor Analysis,
Tasucu Bay*

Abstract

The purpose of this study is to investigate the heavy metal concentration and their possible origin in recent sediments collected from 33 locations along the Tasucu Bay (Mersin) coast, Turkey. Sediment texture, major (Fe, Mg, Al, Si, Ca, Na, K, Ti) and trace elements (Pb, Zn, Mn, Sn, As, Sb, Co, Cr, Cu, Hg, Ag, Cd, Ni, Mo, V, W) in all samples were measured. The overall concentration of major and trace elements were normalized to the Al and the enrichment factor were also derived. Multivariate statistical analyses indicates significant correlation among the heavy metal fractions suggesting that the close relationship of trace metals are from the same source in the study area. The distribution of major and trace elements indicate three different factors where the first factor indicates the anthropogenic activities, the second factor indicates the natural process and the third one as intermediate factor suggesting a perfect difference between sources (anthropogenic) in the study area. Comparison of the elements with other fields shows that Sb, Mo, As, Cr, W, Ni, Sn and Co are rich. Remedial measures should be taken to restore normal conditions especially at The coastal sediments of Tasucu bay.

TAŞUCU KÖRFEZİNDE (MERSİN) SAHİL SEDİMANLARINDA AĞIR METAL İÇERİĞİNİN JEOKİMYASAL VE ÇOK DEĞİŞKENLİ İSTATİSTİK YAKLAŞIMLARLA İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler

*Ağır Metaller,
Çokdeğişkenli İstatistiksel
Analiz,
Veri Analizi,
Faktör Analizi,
Taşucu Körfezi*

Öz

Bu çalışmanın amacı, Türkiye, Taşucu Körfezi (Mersin) sahili boyunca 33 lokasyondan toplanan güncel çökeltelerde ağır metal içeriklerini ve olası kökenlerini incelemektir. Tüm örneklerdeki sedimanter dokusu, ana (Fe, Mg, Al, Si, Ca, Na, K, Ti) ve eser (Pb, Zn, Mn, Sn, As, Sb, Co, Cr, Cu, Hg, Ag, Cd, Ni, Mo, V, W) element içerikleri ölçülmüştür. Ana ve eser elementlerin genel konsantrasyonu Al'a normalize edildi ve zenginleştirme faktörü hesaplanmıştır. Çok değişkenli istatistiksel analizler, ağır metal içerikleri arasında anlamlı bir korelasyon ilişkisini göstermesi ve eser metallerin yakın ilişkisinin olduğunu göstermesi bunların aynı kaynaktan olduğunu göstermektedir. Ana ve eser elementlerin dağılımı üç farklı faktöre işaret etmektedir; birinci faktör antropojenik aktiviteleri, ikinci faktör doğal süreci ve üçüncüsü ise çalışma alanındaki kaynaklar arasında (antropojenik) önemli bir fark olduğunu gösteren ara faktördür. Elementlerin diğer alanlarla karşılaştırılması neticesinde Sb, Mo, As, Cr, W, Ni, Sn ve Co'nun zengin olduğu gözlenmiştir. Taşucu körfezinin özellikle kıyı çökellerinde normal koşulların yeniden sağlanması için iyileştirici önlemler alınmalıdır.

* İlgili yazar / Corresponding author: fusunyalcin@akdeniz.edu.tr, +90-242-310-2311

Alıntı / Cite

Yalcin, F., Jonathan, M. P., Yalcin, M.G., Ilhan, S., Leventeli, Y., (2020). Investigation of Heavy Metal Content in Beach Sediments on The of Tasucu Bay (Mersin) with Geochemical and Multivariate Statistical Approaches, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 8(4), 1113-1125.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

F. Yalcin, 0000-0002-2669-1044
 M.P. Jonathan, 0000-0001-9040-4911
 M.G. Yalcin, 0000-0002-8011-5371
 S. Ilhan, 0000-0002-6616-6084
 Y. Leventeli, 0000-0003-3714-4131

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	30.09.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	28.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	28.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Introduction

Investigation of heavy metal contents in sediments and their sources are very important for solving environmental problems. The importance of heavy metal studies in environments with live and wildlife is increasing. The adsorption properties and sedimentation processes of metals mainly depend on the composition including carbonate content, level of organic matter, grain size, Fe-Mn oxyhydroxides, etc.

The chemical contents of the surface sediments on the coasts and the statistical studies related to these contents have been expanded in the last few decades due to the negative impact of heavy metals and their damage to the ecosystem. As a result, soil or sands act as integrators and amplifiers of concentration of some elements in the waters, which overlook and shipment them and play a vital role in the shallow coastal fields (Jonathan *et al.*, 2004). Determination of chemical contents of heavy metals, multivariate statistical analysis and data analysis related to them are the most common method for the investigation of geogenic and anthropogenic sources of heavy metals in beach sands or sediments (Facchinelli *et al.* 2001; Boruvka *et al.*, 2005; Jonathan *et al.* 2011; Leventeli 2011; Santhiya *et al.* 2011; Yalcin *et al.*, 2013; Yalcin *et al.*, 2016; Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2018; Vetrimerugan *et al.* 2019; Yalcin *et al.*, 2019; Jonathan *et al.* 2019; Yalcin 2020). Scientific studies on heavy metal anomalies along the coastal areas are getting popular. Some examples include environmental impact of the El Salvador copper mine on the coastal sites (Ramirez *et al.*, 2005) and heavy metal contents and their sources in the Mondego Cape beach and dune beach of Portugal (Vidinha *et al.*, 2006). Several authors have conducted various research in and around the present study area from Tasucu Bay coast, Turkey (*ie.*) stratigraphy studies (Okyar 1991; Okyar *et al.*, 2005; Everest and Seyhan 2006; Karakaya *et al.*, 2010); upper slope sediment of northeastern Mediterranean (Ediger *et al.*, 2002); coastal aquifer of Mersin (Demirel, 2004); coastal environment (Burak *et al.*, 2004); fluxes of trace (Kocak *et al.*, 2005). In the Mediterranean region, a high concentration of heavy minerals, corresponding to about 86% of the heap sediment, is found in some rocks of ultramafic origin to the west of Antalya. (Ergin *et al.*, 2007). The region soils of the Musali chromite deposit have Fe and Zn anomalies ranging from 10 367 to 201 785 mg g⁻¹ and from 80 to 372 mg g⁻¹, respectively. The soil samples of Silifke and Anamur have Zn and Fe anomalies varying from 6270 to 60478 mg g⁻¹ and from 707 to 5915 mg g⁻¹, respectively (Ozdemir, 2005). Previous study by Yalcin and Ilhan (2008), the study area reveal that Fe, Al, Cl, Mg, Mn, Ti, Cr and Ni were dominant heavy metals in beach and dune sediments from Kizkalesi coast (Mersin). In Susanoglu coast (Tasucu, Mersin), Co, Cr, Mo, Hg, Cd, and Ni anomalies are greater than national acceptable values and some heavy metals show toxic anomalies (Yalcin 2008).

However, other studies have tried to distinguish the distribution areas of heavy minerals and the bedrock associated with them (Okay and Ergun, 2005). The Tasucu Bay (Mersin) in Turkey has a special importance in marine commercial activities within Mediterranean countries. In addition, the study area is also filled with calm beaches and summer residences justifying the value of the present scientific work reporting the data on geochemical elements in the beach area as it serve as basic data for comparison with future similar scientific studies.

2. Experimental**2.1. Study Area**

Tasucu is a district in the Silifke town of Mersin city and its geopolitical position, climate and landscape have attracted people since early epochs. Agriculture, trading, fishing and tourism (culture, beach, plateau and nature) are very common in the Tasucu district which was established in the Mediterranean Sea southern part of the Taurid Mountains (Fig. 1).

The Mersin harbour mainly functions as a base for commercial products and in addition it also serves for vast number of passenger vessels and motor vehicles. Orange, tangerine, lemon and strawberry are the main agricultural products that are exported from the study area. During the May-August period every year the Chelonia

Mydas and Logger Head (*Caretta Caretta*) turtles visit the Tasucu shoreline signifying the environmental importance of the study area. Tourists visit the beaches regularly between April and October for swimming and to enjoy the natural beauty where various bird species also visits during different times. The Tasucu Bay and its surroundings the Göksu delta has sunshine for a maximum of 300 days covering an area of 22,640 hectares where it hosts 332 different bird species. Goksu delda has an international importance with its watery habitat that is Convention on Wetlands of International Importance especially named as Waterfowl Habitat-RAMSAR (Tasucu Municipality, 2005).

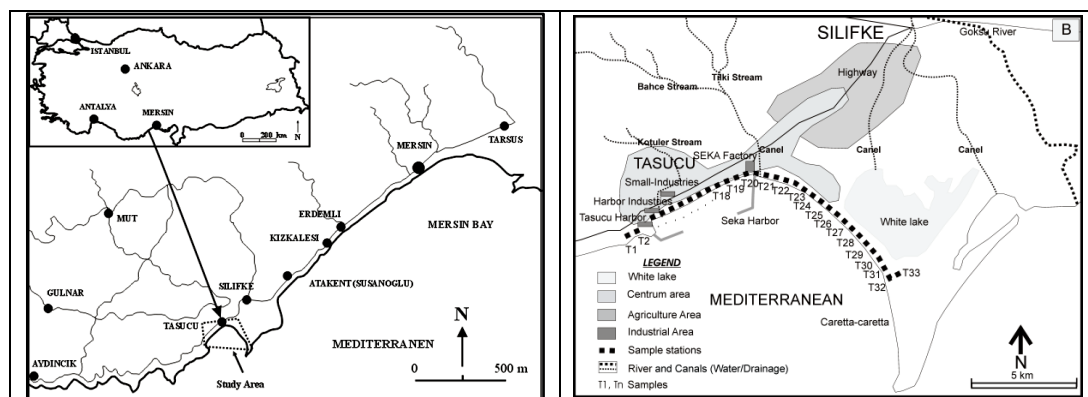


Figure 1. Study area (A) and sampling (B) locations of Tasucu beach area, Turkey.

There are old and new industries in the region that can generate harmful waste. In addition, a major harbor and human activities have altered the ecosystem prominently. Agricultures lie 10 to 20 km from the coast. Harbor industries on his hands coastal zone. The old paper factory (SEKA) is in the central coastal. Small or medium-sized industries developed in the study area near the coastline (Fig 1).

2.2. Regional geology

Mesozoic lithological units in Anatolia document the development of a mosaic of micro-continents and carbonate platforms separated by ophiolitic suture regions. Also, the area is typical of the oceanic crust formed as a result of the Triassic disintegration of Gondwana lands (Özer et al., 2004). This complex and intertwined structure was formed as a result of the closure of different branches of the Neo-Tethys Ocean (Şengor and Yilmaz, 1981; Şengor, 1987). The study area subject to study consists of sedimentary rocks and represents the Miocene carbonate rocks of the Tauride belt (Ozgul 1971, 1976). The formations in the study area were exposed in the terrestrial conditions that occurred at the beginning of the Miocene period and were deposited under sea conditions in the later geological periods (Gedik et al., 1979).

2.3. Sampling and chemical analyses

Sediment or sand samples were systematically collected along the shore using plastic shovels. Samples taken from Tasucu Bay were analyzed for sediment texture, principal and trace metals. The analyzes and method were made in accordance with the previous scientific studies (Yalcin and Ilhan 2008; Yalcin 2009). Major and trace metals analyzed using Spectro- Xepos Benchtop X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF). Textural studies on the sediments were performed for sand and mud distributions (Ingram 1970).

Sediment samples along the beach area in Tasucu Bay was conducted during August, 2006 and 33 systematic samples were collected from at a depth of 0-10 cm (Fig 1). Approximately 1 kg of sediment sample were collected in an equal distance interval of about 250 m with an hard plastic sample shovel. In order to minimize the contamination, the plastic bags were pre-cleaned with 6 M HNO₃ and rinsed with distilled water and then heated at 40° C before the storing the samples. Sediment samples were dried at 50° C for 24 hours and it was processed for further analysis. Dried samples were sieved through 2 mm plastic sieve and coarse grained sediments were seperated. The samples were then homogenized with an agate mortar to a grain size of less than 2 mm. The mortar was washed with 6 mol l-1 HNO₃ and rinsed with distilled water and dried before the each sample process.

Analyses of Cu, Al, Fe, Ag, W, Mg, Co, Ni, Zn, Mo, Sb, Hg, Ti, Cr, Cd, Pb, As, Sn, V, Si, Ca, S, Na, K and Mn element contents were obtained with the XRF. Prior to analysis, all the samples were transformed to double sided film tablets in 32 mm diameter. The detection arrangement for analysis is a Peltier cooled drift detector with energy resolution FWHM <170 eV with microprocessor controlled detectors and electronics, 10,000 pulsed input number votes were measured for the Mn and K α line. The analysis results with XRF are given as $\mu\text{g g}^{-1}$ and percentage.

BCSS1, an approved reference material, was used for analytical precision (Table 1) (Yoshinaga *et al.* 1996). Heavy metal enrichments were confirmed the Espinho to Mondego Cape –Portugal (Vidinha *et al.*, 2006), Acceptable limit for Turkey (Anonymous, 2005), Kizkalesi Coast (Yalcin and Ilhan, 2008), Bosphorus (Güven *et al.*, 1993), Eastern Black Sea (Ergül *et al.*, 2008) and Susanoglu Coast (Yalcin 2008) by concentrations of heavy metals.

Table 1. Comparison of BCSS-1 (Yoshinaga *et al.* 1996) international standard values with that of present study

Elements	This Study	BCSS-1a
S(%)	1183	-
Si(%)	9.45	30.9b
Al(%)	0.53	6.26 b
Fe(%)	0.59	3.29 b
Ca(%)	22.66	0.543 b
Mg(%)	1.31	1.47 b
Na(%)	0.23	2.02 b
K(%)	0.22	1.80 b
Ti(%)	0.08	0.440 b
Mn	230.42	229
Cr	349.61	123
Cu	7.50	18.5
Ni	99.09	55.3
Co	19.18	11.4
Pb	3.39	22.7
Zn	13.52	119
Cd	4.45	0.25
As	18.41	-
Ag	3.99	-
Hg	2.34	0.129
Mo	25.16	-
Sb	5.81	-
Sn	7.91	-
V	49.13	93.4
W	7.19	-

Major Element (%), Trace metals ($\mu\text{g g}^{-1}$); a: Certified value from NRCC; b: Converted from the original certified value of the metal oxide form.

The concentration of samples were concurrently processed in statistical software [Bridgman, 1992; STATISTICA (Version 7.0)] to identify the relationship between various parameters. The whole data set was processed for three different p values ($p < 0.05, 0.01, 0.001$) to identify the maximum correlation (Davis, 1986). The standardized data set was used to generate the R-mode factor analysis [Factor 1 (F1), Factor 2 (F2), Factor 3 (F3)] with rotation was applied and the final results were also selected based on the eigen values which are more than 1. The dendograms for the results were generated from the standardized data using the formula $X - \mu - \sigma - 1$ (where σ = standard deviation; μ = mean and X = variable).

3. Results and discussion

3.1. Geochemical variations of elements

Results of textural parameters (sand, mud), sedimentary sulphur (S) and geochemical elements (Cr, Cu, Al, Pb, Zn, Fe, Mg, Ti, Sn, Mn, Ni, Co, Cd, As, Hg, Ag, Sb, W, V, Si, Ca, Na and K) collected along the Tasucu Bay shoreline is presented as Al normalized values in Table 2 and 3 respectively. The natural mineralogical variation and granular variability are best compensated by geochemical normalization, especially of major and trace elements (Loring, 1991). The Al element remains the most successful and widely used normalizer by scientists. Aluminum represents the quality of alumino-silicate, the most important carrier for metals adsorbed in beach sediments. Because, it compensates for differences in grain size and composition in the sediments. The variability of the normalized concentrations is expressed as an enrichment factors (EFs), which is a ratio of the content of the element in the analyzed layer to the content corresponding to the pre-industrial period. It is calculated by the following formula 1 :

$$EF \text{ (enrichment factors)} = (C_x/C_{Al})_s / (C_x/C_{Al})_c \quad (1)$$

where, $(C_x/C_{Al})_s$ ratio of concentration of element x and aluminium in the sample, $(C_x/C_{Al})_c$ ratio of concentration

of element x and aluminium in unpolluted sediments (Continental crustal values, Taylor and McLennan, 1985). An enrichment factor of around 1.0 indicates that the precipitate is predominantly due to lithogenic material. However, an enrichment factor much greater than 1.0 indicates that the element is mostly of anthropogenic origin (Szefer *et al.*, 1996). Thus the whole aspect in the present study is based on the geochemical interpretation of the normalized values and the enrichment order of metals in the study area.

Table 2. Results of textural parameters, sedimentary sulphate, and Al from Tasucu Bay area, Turkey.

Element/ Sample Nos.	Sand	Mud	S	Al
T1	94	6	604	0.78
T2	91	9	851	0.67
T3	93	7	1175	1.08
T4	91	9	830	0.54
T5	93	7	713	0.33
T6	93	7	4717	0.63
T7	94	6	1319	0.68
T8	95	5	953	0.44
T9	94	6	2450	0.30
T10	97	3	1764	0.31
T11	96	4	427	0.56
T12	96	4	616	0.56
T13	93	7	1321	0.49
T14	98	2	2079	0.52
T15	95	5	2726	0.36
T16	98	2	1243	0.51
T17	98	2	528	0.68
T18	96	4	2071	0.16
T19	97	3	531	0.84
T20	98	2	974	0.65
T21	98	2	1359	0.49
T22	99	1	1294	0.46
T23	98	2	1208	0.42
T24	98	2	979	0.62
T25	97	3	831	0.49
T26	98	2	836	0.42
T27	98	2	791	0.45
T28	97	3	808	0.53
T29	97	3	985	0.54
T30	97	2	431	0.64
T31	97	3	793	0.56
T32	97	3	842	0.67
T33	90	10	NA	NA
Avg.	95.79	4	1220	0.54

(All values are expressed in %)

Table 3. Al normalized values of major and trace elements from Tasucu Bay area, Turkey.

Element/ Sample No.	Si/Al (%)	Fe/Al (%)	Ca/Al (%)	Mg/Al (%)	Na/Al (%)	K/Al (%)	Ti/Al (%)	Cr/Al (×10-4)	Cu/Al (×10-4)	Ni/Al (×10-4)	Co/Al (×10-4)	Pb/Al (×10-4)	Zn/Al (×10-4)	Cd/Al (×10-4)	As/Al (×10-4)	Ag/Al (×10-4)	Hg/Al (×10-4)	Mo/Al (×10-4)	Sb/Al (×10-4)	Sn/Al (×10-4)	V/Al (×10-4)	W/Al (×10-4)
T1	17.81	0.81	28.64	1.48	0.10	0.43	0.13	802.25	14.63	136.19	25.67	4.11	15.15	5.65	25.67	5.52	3.08	34.66	7.19	10.01	67.26	9.50
T2	20.80	0.93	32.49	1.64	0.40	0.44	0.15	898.19	16.38	138.08	28.30	5.06	18.92	6.70	29.49	4.47	3.43	37.24	9.24	11.77	79.24	10.28
T3	10.43	0.79	14.36	1.40	0.13	0.37	0.17	245.54	12.37	69.11	18.60	6.14	18.14	4.46	11.81	4.00	1.86	21.39	5.49	7.81	90.22	5.86
T4	17.47	1.08	48.87	3.20	0.15	0.39	0.15	780.43	6.35	123.23	35.47	9.15	27.45	8.40	34.91	6.35	4.85	48.54	12.14	15.31	103.44	13.82
T5	20.31	1.61	80.12	3.10	0.26	0.38	0.23	1357.39	8.16	104.00	57.44	18.14	35.98	15.72	56.84	11.79	7.86	78.60	19.05	26.30	149.95	20.86
T6	12.84	0.91	33.32	2.13	0.46	0.43	0.17	194.56	9.02	75.45	30.05	8.54	21.67	7.91	28.00	5.85	3.80	41.13	9.17	12.34	79.09	11.07
T7	16.14	0.91	30.79	2.36	0.66	0.37	0.13	687.35	33.05	140.99	27.91	12.48	36.86	6.46	27.61	5.14	3.23	36.72	8.22	10.72	84.16	10.13
T8	23.31	1.09	57.58	2.35	0.25	0.49	0.16	1772.80	16.70	202.21	41.17	6.63	48.72	9.38	50.32	8.46	5.49	61.76	12.58	16.47	101.79	16.93
T9	32.60	1.33	79.91	3.47	1.75	0.52	0.16	1086.77	9.58	317.44	56.16	8.26	37.99	14.53	67.06	12.88	8.26	89.19	18.83	25.10	131.47	24.44
T10	20.40	1.35	90.29	3.35	1.09	0.43	0.18	2308.09	107.65	173.59	58.19	9.05	24.57	15.19	75.64	19.07	8.40	84.05	21.01	29.09	192.34	25.21
T11	26.64	1.06	32.42	1.16	0.15	0.55	0.15	788.24	23.18	216.86	33.17	8.74	27.11	7.85	27.82	5.71	3.39	41.02	10.52	12.66	77.04	11.24
T12	23.87	1.01	35.75	1.21	0.27	0.56	0.14	676.66	20.05	219.83	30.07	8.23	23.81	7.88	28.82	6.27	3.58	42.96	10.02	14.14	49.94	11.99
T13	22.44	0.96	52.05	2.19	0.71	0.48	0.14	975.14	15.00	237.81	36.49	5.07	17.84	8.72	39.53	11.35	5.07	56.77	11.56	16.83	72.38	15.61
T14	20.04	0.96	47.81	2.40	0.89	0.44	0.13	669.49	14.13	207.81	36.76	4.84	15.29	7.74	42.57	6.00	4.84	52.24	12.00	15.67	93.26	14.51
T15	21.64	1.15	67.34	2.62	1.76	0.48	0.16	524.09	9.93	149.23	46.89	6.90	21.24	12.69	51.03	17.65	6.90	71.72	15.17	20.69	89.09	20.41
T16	22.49	1.09	42.50	2.10	0.84	0.49	0.14	1258.98	23.16	231.41	35.63	6.53	38.01	8.31	33.06	7.13	4.35	47.51	11.48	15.04	87.69	13.26
T17	23.86	0.97	27.29	1.10	0.28	0.48	0.14	1163.99	21.93	178.94	29.28	7.36	27.22	6.33	20.60	5.15	3.09	33.85	8.09	11.77	74.90	9.86
T18	28.11	2.23	172.93	3.43	2.78	0.48	0.20	1364.85	21.94	147.45	97.49	17.06	30.47	31.07	138.92	22.54	17.06	158.42	39.00	51.79	221.79	44.48
T19	14.33	0.97	27.29	1.16	0.10	0.37	0.15	717.43	9.83	137.45	26.52	5.45	19.06	5.21	12.19	4.62	2.60	33.15	6.63	10.30	57.54	8.29
T20	16.01	0.91	33.23	1.42	0.20	0.42	0.15	403.29	9.24	89.59	27.71	5.85	18.78	6.31	18.01	9.39	3.39	38.48	8.93	13.24	81.27	9.85
T21	17.60	1.51	45.02	3.58	0.80	0.43	0.14	195.43	6.79	265.99	43.20	5.55	32.30	9.46	49.37	9.87	4.94	51.43	12.14	14.40	123.84	15.63
T22	16.27	1.40	52.86	3.83	0.55	0.42	0.13	228.10	7.68	236.43	43.86	5.26	28.95	10.75	45.18	8.33	5.70	57.02	12.72	18.20	135.54	16.67
T23	16.62	1.44	58.59	3.15	0.53	0.42	0.15	559.84	12.81	208.99	45.07	4.98	31.55	11.39	46.26	12.57	5.93	61.68	14.71	18.74	110.78	18.27
T24	14.08	0.97	40.49	3.54	0.48	0.38	0.12	176.96	5.63	131.60	32.17	3.70	22.52	6.76	32.17	6.11	4.18	40.22	9.33	12.55	90.73	11.90
T25	15.28	1.30	49.91	3.30	0.16	0.40	0.14	347.58	6.87	191.37	40.42	4.85	24.05	9.50	40.62	7.88	5.05	50.52	12.93	16.97	103.87	15.16
T26	17.73	1.67	57.31	3.66	0.20	0.44	0.14	212.70	8.04	255.95	49.63	4.96	30.25	11.34	51.52	9.22	5.91	59.08	13.71	20.80	153.14	18.91
T27	16.02	1.32	55.46	3.57	0.18	0.41	0.14	332.53	7.71	166.26	44.04	4.18	25.99	10.57	39.42	8.15	5.51	55.05	14.31	20.04	106.81	16.30
T28	14.70	1.20	48.52	3.25	0.27	0.37	0.13	425.98	6.44	153.35	37.87	4.92	22.91	8.71	37.68	6.44	5.11	53.01	12.31	16.28	108.10	14.01
T29	16.02	1.40	40.76	3.63	0.45	0.42	0.15	740.60	8.70	241.62	38.88	6.67	29.99	8.52	40.18	7.41	4.44	44.44	11.29	15.00	71.47	14.44
T30	15.56	1.11	39.65	3.34	0.13	0.38	0.14	517.02	5.33	158.40	32.90	3.13	21.93	5.95	35.88	7.36	4.07	42.30	9.24	11.59	80.69	11.91
T31	14.92	1.18	43.58	2.99	0.50	0.39	0.14	398.63	5.90	167.67	35.75	5.01	37.72	7.51	29.32	6.79	4.29	48.26	10.37	14.84	79.37	12.87
T32	15.14	1.19	34.31	3.69	0.29	0.38	0.12	323.61	6.26	185.37	32.81	2.98	24.16	7.01	34.60	5.52	3.58	40.26	9.54	12.23	88.28	11.33
T33	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

All elements were normalized to aluminum to gain a deeper insight into the mechanisms underlying the different areas of the coast and therefore the origin of the sediments (e.g. Calvert *et al.*, 1993). This element can be considered to represent the detritic component best, as it is assumed to be present only in aluminum silicate phases, along with quartz, which are typical minerals forming the basin under investigation (Careda *et al.*, 1999). The trend of the Fe/Al and Mg/Al ratio (Table 3) generally suggest that mostly all the sediments in the beach is supplied through anthropogenic sources and partially through natural sources (in some stations) as the study area lies in a curve like structure. However, the trend of the Fe/Al indicates that it not only receives material deriving from the normal erosion/deposition processes in T1-T3, T6, T7, T13, T14, T17, T19, T20 and T24 of stations. The trend of the Mg/Al ratio (Table 3) generally reveals that the beach sediments is also supplied by different sources in T4, T5, T9, T10, T18, T21-T30 and T32 stations. The distribution of trace element such as Ti and Al is constant, and it could be inferred that the material is brought down by the rivers (Goksu River, Water/Drainage canals, Kotuler, Bahce and Tilki Streams) close to the area affecting the composition of the sediment which are primarily from the Miocene carbonate rocks (Fig 1). The K/Al ratio (Table 3) is generally constant along on the coast and reflects the distribution of the potassium feldspars present in the host carbonate rocks.

The low variations in certain major (Na, Si, Ti and K) and trace element (Pb, Cu, Cd, Ag and Hg) concentrations (Al normalized values) suggests that the bulk mineral composition is from the same source. However, the concentration pattern of Ca is very high (14.36%-172.93% concentration range) compared to other major elements indicating that the area is dominated by carbonate rocks. The marked increase of trace metals in the beach sediments matches the industrial revolution during the last two decades suggesting that the anthropogenic activities has increased in this part of the area. The region's economy (Tasucu Bay) is mostly based on sea-related activities, shipbuilding, automobile industries, agriculture, chromite mining are some of the highlights among the industrial activities. The geographical position in the present study is most important in explaining the differences observed among the sediments. The higher concentrations of trace metals in the central part is mainly due to the (shipbuilding activities, the old SEKA Factory and endustrial activities) indicating that the source area is dominated by these industries. The higher values of trace metals (Cr, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W) in the present study indicates that the increase in input of metals from the intertidal activities of the beach area and they are from a multiple source points in the study area.

3.2. Correlation matrix

Correlation matrix of the geochemical parameters in the present study indicates distinctive relationship among major and trace elements (Table 4). The positive relationship (> 0.50) among sand vs contaminated elements (Sn, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W) indicates that these trace elements are attached to the surface of sand particles. Moreover, the positive association of these elements with Fe indicates that they could be from the effluents of iron related industries. The association of Ca and Mg with these elements (Sb, As, Hg, Ag, Mo, W, Sn,) also suggests that they are absorbed onto the calcareous materials in the beach sediments rather than the finer sediments. The above inference on association of elements clearly signify that they are anthropogenic in nature. The enrichment of trace metals in the beach sediments is mainly due to the anthropogenic sources which includes waste from heavy metal-bearing fuel industries, chemical clean-up material of vessels at the Tasucu harbor, chemical and product wastes of the old SEKA paper plant at the harbor, urban wastes of Tasucu town and wastes of fertilizers used in the agricultural fields. All along the coast there is no strong currents which will significantly affect the beach, but the small waves generated in the coast and Tasucu harbor could affect the deposition of sediments in the beach region. The enrichment of metals in samples (T19, T20, T21) could also be due to the impact of vessel wastes on the Tasucu coast. The negative impact of chemical material wastes is observed in samples collected in the vicinity of the old SEKA paper plant. Similarly, fertilizer contamination is also detected in areas of river outlets, uncontrolled urban wastes, waste disposal sites of hotels on the coast and recent coastal erosion.

Table 4. Correlation coefficient matrix (R2) of major and trace elements in recent sediments from Tasucu beach area, Turkey (p <0.05*, 0.01†, 0.001‡)

	Sand	Mud	S	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Ti	Mn	Cr	Cu	Ni	Co	Pb	Zn	Cd	As	Ag	Hg	Mo	Sb	Sn	V	W
Sand	1.00																										
Mud	-	1.00																									
S	-	-	1.00																								
Si	-	-	-	1.00																							
Al	-	-	-	0.71*‡‡	1.00																						
Fe	0.41*	-	-	0.52*†	0.81*‡‡	1.00																					
Ca	0.40*	-	-	-	-	-	1.00																				
Mg	0.35*	-	-	-	0.40*	0.67*†‡	0.43*	1.00																			
Na	-	-	0.65*†‡	-	-	-	-	-	1.00																		
K	-	-	-	0.87*†‡	0.94*‡‡	0.72*†‡	-	-	-	1.00																	
Ti	-	-	-	0.64*†‡	0.95*‡‡	0.74*†‡	-	-	-	0.88*†‡	1.00																
Mn	0.40*	-	-	0.75*†‡	0.64*‡‡	0.73*†‡	0.40*	0.43*	-	0.73*†‡	0.55*†	1.00															
Cr	-	-	-	0.60*†‡	-	-	-	-	-	0.35*	-	-	1.00														
Cu	-	-	-	0.35*	-	-	-	-	-	-	-	-	0.62*†‡	1.00													
Ni	-	-	-0.43*	-	-	-	-0.82*†‡	-	-	-	-	-	-	-	1.00												
Co	0.40*	-	-	0.60*†‡	0.85*†‡	0.83*†‡	-	0.73*†‡	-0.36*†‡	0.43*	0.48*†	0.54*†	-	-	-	1.00											
Pb	-	-	-	0.47*†	0.53*†	0.34*	-	-	-	0.52*†	0.65*†‡	-	0.36*	0.45*†	-0.35*	-	1.00										
Zn	-	-	-	0.54*†	0.64*†‡	0.67*†‡	-	-	-	0.61*†‡	0.60*†‡	0.56*†‡	-	-	-	0.46*†	0.58*†‡	1.00									
Cd	-	-	0.37*	-	-	0.47*†	0.66*†‡	-	-	-	-	-	-	-	0.78*†‡	-	-	-	1.00								
As	0.34*	-	-	-	-	-	0.81*†‡	0.56*†‡	0.36*†‡	-	-	0.38*	-	-	-	-	-	-	0.58*†‡	1.00							
Ag	-	-	-	-	-	-	0.55*†‡	-	-	-	-	-	-	-	0.58*†‡	-	-	-	0.40*	0.39*	1.00						
Hg	0.40*	-	-	-	-	0.43*	0.97*†‡	0.54*†	-	-	-	0.45*†	-	-	0.85*†‡	-	-	-	0.74*†‡	0.84*†‡	0.55*†‡	1.00					
Mo	0.35*	-	-	0.38*	0.36*	0.52*†	0.91*†‡	0.47*†	-	-	-	0.58*†‡	-	-	0.79*†‡	-	-	-	0.64*†‡	0.72*†‡	0.56*†‡	0.92*†‡	1.00				
Sb	0.40*	-	-	0.35*	0.35*	0.59*†‡	0.86*†‡	0.51*†	-	-	0.35*	0.60*†‡	-	-	0.85*†‡	0.35*	-	-	0.80*†‡	0.75*†‡	0.47*†‡	0.90*†‡	0.86*†‡	1.00			
Sn	0.43*	-	-	-	0.38*	0.58*†‡	0.81*†‡	0.39*	-	-	0.40*	0.52*†	-	-	0.82*†‡	0.37*	-	-	0.78*†‡	0.54*†	0.51*†	0.81*†‡	0.90*†‡	0.81*†‡	0.90*†‡	1.00	
V	-	-	-	-	0.66*†‡	0.73*†‡	-	0.57*†‡	-	0.52*†	0.69*†‡	0.40*	-	-	0.51*†	0.57*†‡	0.38*	0.49*†	0.54*†	0.36*	-	0.47*†	0.45*†	0.59*†‡	0.59*†‡	1.00	
W	0.42*	-	-	-	-	-	0.80*†‡	0.61*†‡	-	-	-	-	-	-	0.45*†	0.38*	-	-	0.50*†	0.86*†‡	0.47*†	0.81*†‡	0.71*†‡	0.63*†‡	0.57*†‡	-	1.00

The close association of Al vs K (0.94) clearly indicates the presence of potash feldspar in the beach sediments. The association of Si vs Al (0.71), Fe (0.52), K (0.87), Ti (0.64), Mn (0.75) suggests that they are present as aluminosilicates in the beach sediments. The positive relationship of Si vs Cr (0.60), Pb (0.47), Zn (0.54) clearly suggest that they are from external source and are bound in the outer side of the sandy particles. Terra rossa soils characteristically observed in southern parts of the Bolkar Dağları Mountains comprise the source of Al. The positive relationship of Fe with K, Ti indicates the deposition of sediments from the basement rocks that the Bolkar Dağı unit as it is represented by carbonate and clastic rocks together with olistostrome rocks with ages changing from Devonian to lower Tertiary. The Bozkır unit is composed acidic tuff, basic, ultrabasic rocks and serpentinites and also shelf units and oceanic crust rocks of Triassic-Senonian age that were formed in various facies and environments (Yetis and Demirkol, 1986; Ozgul and Kozlu, 2002). The association of Ca, Mg with toxic elements (Ag, Hg, Cd, Sb, Sn, As, Mo, and W) clearly signifies that they are absorbed into the calcareous materials in the beach sediments. The association of Cr vs Cu (0.62); Pb vs Zn (0.58); Cd vs As (0.58), Hg (0.74) Mo (0.64), Sb (0.80), Sn (0.78), V (0.54), W (0.50) indicates that they are anthropogenic which is mainly due to the effluent or industrial input in the study area. The association of trace metals (Sb, As, Mo, Ag, Hg, Sn) among themselves suggest that they are from a single source closely related to chemical industry.

3.3. Factor and cluster analysis

Three factors were derived based on the eigenvalues (> 1) as well as the total variance to determine the factors with different characteristics that control the distribution of different variables in the beach area. The overall systematic variation in the factor analysis is presented in Figure 2, Table 5.

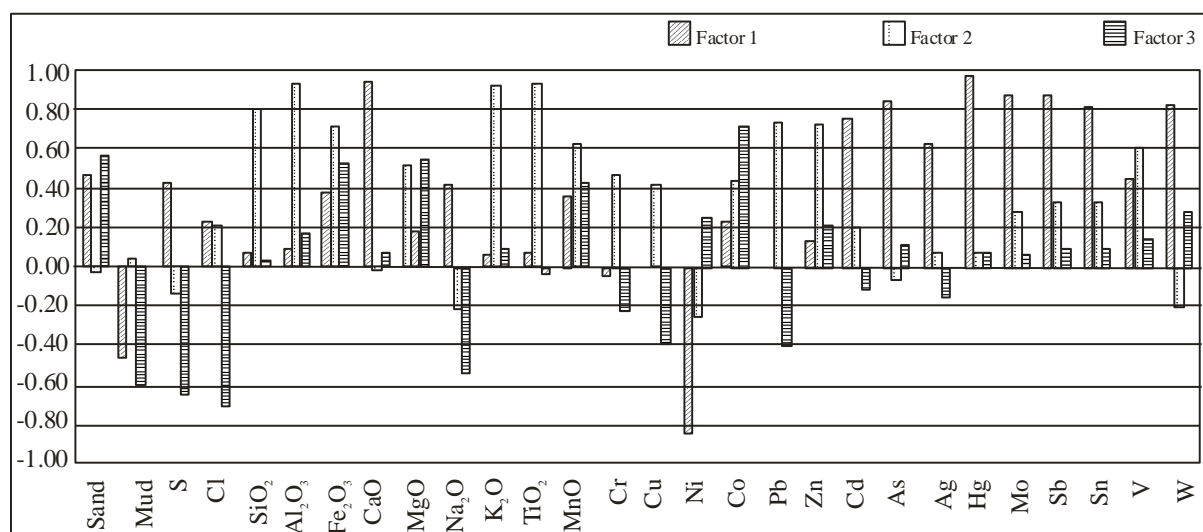


Figure 2. Results of factor analysis (R-mode) showing the relationship between the various elemental compositions of the three primary factors in surface sediments of Tasucu beach area, Turkey.

Table 5. Explanation of cumulative percentage of sediment samples with eigen values

Factor	Eigen values	Cummulative percentage
1	10.52	37.57
2	5.31	56.54
3	3.49	69.01

The first factor has a high eigenvalue of 10.52, and this value explains 37.57% of the total variance. In the first factor, the association of Ca, Mg, Cd, As, Ag, Hg, Mo, Sb, Sn and W point out that they are associated with the calcareous rocks found of the study area (Ca and Mg) in the beach sediments. The general distribution of heavy metals is similar to the anomalies of Susanoglu beach sands (Yalcin 2009). In addition, all the elements apart from these are polluted elements and it is not from a natural source. In this case, the factor belonging to these elements can be named as "anthropogenic factor". The second factor (Factor 2) explains 18.92% of the total variance with an eigenvalue of 5.31. This factor can be termed as "natural process factor" where it is clearly identified by the association of Si, Al, Fe, K, Ti, V and Mn. The unity of the above elements is important. Because these also indicate the presence of heavy minerals in beach sediments. The association of Zn and Pb with these elements explains that they are anthropogenic and show that they are together with heavy metals in the study area. The third factor (Factor 3) explains 12.47% of total variance with an eigenvalue of 3.49. This factor can be termed as "intermediate factor" indicating the association of sand, Fe, Mg and Co. The separate behavior of Co in this factor indicates that it is from a separate origin than other elements and also with Fe related industries. Iron-bearing wastes from

maintenance of vessels at the Tasucu harbor might be the source of pollution. In addition, small-scale trash and industrial wastes can also cause these type of association.

Cluster analysis made out of complete linkage analysis indicates four different clusters which are clearly marked as cluster 1, 2, 3 and 4 (Fig 3). The analysis of cluster analysis indicates that Ni has a separate source in the Tasucu and it is closely associated with the finer sediments (Cluster 1). The close linkage of W, As, Cd, Sn, Sb, Mo, Hg with Ca suggest that they are with the carbonate fraction and where the sulphates are also high as evidenced in cluster 2. The linkage of Pb, Cu, Cr, Zn, K, Ti, Al, Mn, Si suggest that these elements are in the form of aluminium silicates and/or ultrabasic rocks and the separate linkage of Pb, Cu, Cr indicates that they are of separate origin from a different source (Cluster 3). The clustering of V, Mg, Co, Fe with sand in cluster 4 reveals that the trace metals are combined with the sand fraction especially as coatings along with Fe and this could be closely related to the iron related smelting industries. The observed linkage distance between various parameters in the cluster analysis suggest that the source area for these elements are from various sources of different industries.

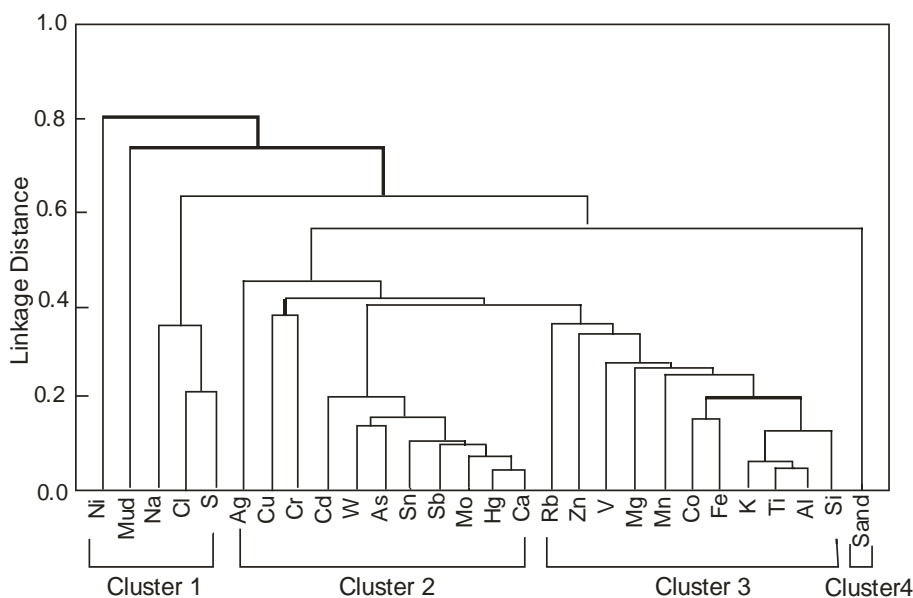


Figure 3. Dendograms based on complete linkage method for samples of Tasucu beach area, Turkey

4. Evaluation of metal pollution

The enrichment of trace metals were evaluated based on the enrichment factor calculations (EFs). Normally the higher EF values of more than 1 indicates that the concentration of elements are high than the normal level (Zoller *et al.* 1974; Hakanson, 1980). The enrichment order of the trace metals indicates the following order: Sb (501.14)> Mo (286.87)> As (218.10)> Cr (70.03)> W (60.93)> Ni (32.32)> Sn (24.61)> Co (18.56)> V (7.60)> Cu (4.93)> Pb (3.25)> Zn (3.03)> Fe (2.71)> Ag (1.38)> Cd (0.78). The higher EF values in the beach sediments reflects record of anthropogenic activities which are presently at very high levels in the Tasucu bay area. The EF values of present study indicates very high values which is mainly due to the low Al content in the sandy sediments. The principal sources for these contaminants includes wastes of vessels navigating over the Tasucu Bay, wastes from tourism activities, municipal wastes from settlement area of the Tasucu Bay, uncontrolled urban wastes of the Tasucu Bay, highway between Mersin and Antalya road, fertilizers used in agriculture and trash sites of touristic hotels industries situated close to the beach area and the effluent input through agricultural activities.

The enrichment pattern further suggest that the metals are first distributed into the coastal area and then they have been deposited in the beach sediments due to the tidal activity which does not the force the sediments to be transported to other areas or deep inside the coast. The higher EF values of Ca (134.12) and Mg (16.02) suggest that the contaminants are closely associated with the carbonate fractions in the study area which is also dominant with the Miocene group of rocks.

The comparison of metal concentration with other in the study area with other coastal regions indicates it is contaminated considerably by trace metals (Cr, Cd, Hg) (Table 6). The enrichment of these trace metals suggest that they are specifically supplied from the anthropogenic activities that is taking place in the region and from the surrounding industries. The higher values also indicate that certain measures (environmental management) must be made to reduce the level of the abnormal metals in sediments before they get out of control.

Table 6. Comparison of metal concentration of various elements from different parts of world and Turkey with that of Tasucu beach area, Turkey

Study area/ Elements	Portugal (1)	Acceptable limit for Turkey (2)	Kizkalesi (3)	Bosphorus (4)	Eastern Black Sea (5)	Susanoglu (6)	Present study
Al	61000	-	8267	-	-	11924.24	5300
Fe	21000	-	18803	11100-31000	56800-60500	13909.09	5900
Mg	7000	-	34993	-	-	15624.24	13100
Mn	369.8	-	586	112-146	652-673	333.85	230.42
Ti	-	-	813	-	-	736.36	800
Ag	-	-	4.13	-	-	4.12	3.99
As	-	20	24.74	-	12.60-13.10	19.91	18.41
Cr	62.8	100	554	22.04-61.71	70.02-74.24	428.06	349.61
Co	47	20	28.2	9.03-21.76	22.60-23.90	21.41	19.18
Cu	361.2	50	10.13	7.44-46.16	52.03-56.86	12.81	7.50
Cd	-	-	4.21	2.28-3.22	<0.02	4.32	4.45
Hg	-	1	2.05	-	-	1.72	2.34
Mo	-	10	25.96	-	-	27	25.16
Ni	39.9	30	186.8	16.79-58.74	23.61-26.53	145.52	99.09
Pb	71.7	50	4.55	35.7-135.3	<0.1	5.51	3.39
Sb	-	-	5.95	-	0.64-0.99	5.67	5.81
Sn	-	20	8.17	-	-	7.83	7.91
V	-	-	63.3	-	-	38.12	49.13
W	-	-	7.61	-	-	6.58	7.19
Zn	112.8	150	19.75	42.80-118.53	169-182	17.80	13.52

All values ($\mu\text{g g}^{-1}$) are expressed as (1) Vidinha *et al.* 2006; (2) Anonymous, Acceptable limit for Turkey, 2005; (3) Yalcin and Ilhan 2008; (4) Guven *et al.*, 1993; (5) Ergul *et al.*, 2008; (6) Yalcin 2008.

5. Conclusion

The overall study in the Tasucu bay area indicates that the beach sediments are sandy in nature and are partially reduced in nature due to the presence of high concentration of sulphates. The presence of carbonates in the study area suggest that the trace metals in the study area are closely associated and absorbed in the carbonates (as evidenced by correlation of elements). The close relationship and clustering of trace metals (Ag, W, As, Cd, Sn, Sb, Mo, Hg) with carbonates suggest that they are associated with the carbonates. Heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, K, Ti, Al, Mn) accumulation is associated with the aluminium silicates and ultrabasic rocks. The concentration pattern and the association of Pb, Cu, Cr indicate that they are of separate origin from a different source whereas, V, Mg, Co, Fe are associated with coarse grained particles (sand) suggesting that they are closely related to iron related smelting industries.

Based on results of basic geochemical chemical analysis and statistical relationship among the elements, the trace metal distribution pattern indicates that the beach sediments are contaminated to a considerable extent which will act as possible toxic agents for environment and human health and care should be taken immediately to bring down the level of enrichment of metals.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Anonymous 2005. Toprak Kirliliginin Kontrolu Yonetmeligi, 2005 tarih ve 25831 sayili Resmi Gazete, 31 Mayıs, Ankara, (in Turkish)
- Bridgman, H.A., 1992. Evaluating rain water contamination and sources in southwest Australia using factor analysis, *Atmos. Env. Gen. Top.* 26A, pp. 2401-2412
- Boruvka, L., Vacek, O., Jehlicka, J., 2005. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils. *Geoderma* 128, 289-300, doi: 10.1016/j.geoderma.2005.04.010
- Burak, S., Dogan, E., Gazioglu, C., 2004. Impact of urbanization and tourism on coastal environment. *Ocean & Coastal Management* 47, 515-527, doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.07.007
- Calvert, S.E., Pedersen, T.F., Thunell, R.C., 1993. Geochemistry of the surface sediments of the Sulu and South China Seas. *Mar Geol* 114, 207-231, doi: 10.1016/0025-3227(93)90029-U
- Caredda, A. M., Cristini, A., Ferrara, C., Lobina, M.F., Baroli, M., 1999. Distribution of heavy metals in the Piscinas beach sediments (SW Sardinia, Italy). *Environmental Geology* 38 (2), 91 - 100, doi: 10.1007/s002540050405
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and data analysis in geology*. 2nd edn. Wiley Inc, NY, Accession Number: WOS:A1986E538700012
- Demirel, Z., 2004. The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey. *Journal of Environmental Management* 70, 275-282, doi: 10.1016/j.jenvman.2003.12.007
- Ediger, V., Velegrakis, A.F., Evans, G., 2002. Upper slope sediment waves in the Cilician Basin, northeastern Mediterranean. *Marine Geology* 192, 321-333, doi: 10.1016/S0025-3227(02)00562-5

- Ergin, M., Keskin, S., Dogan, A.U., Kadioglu, Y.K., Karakas, Z., 2007. Grain size and heavy mineral distribution as related to hinterland and environmental conditions for modern beach sediments from the Gulfs of Antalya and Finike, eastern Mediterranean. *Marine Geology* 240, 185–196, doi: 10.1016/j.margeo.2007.02.006
- Ergul, H.A., Topcuoglu, S., Olmez, E., Kirbasoglu, C., 2008. Heavy metals in sinking particles and bottom sediments from the eastern Turkish coast of the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78, 396–402, doi: 10.1016/j.ecss.2008.01.006
- Everest, A., Seyhan, L., 2006. Investigations of basic soil parameters in mersin: Kozlar high plateau of south Turkey. *Building and Environment* 4, 837–841, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.03.002
- Facchinelli, A., Galini, L., Barberis, E., Magnoni, M., Hursthouse, A.S., 2001. The influence of clay mineralogy on the mobility of radiocaesium in upland soils of NW Italy. *Environmental Radioactivity* 56, 299–307, doi: 10.1016/S0265-931X(00)00206-X
- Gedik, A., Birgili, S., Yilmaz, H., Yoldas, R., 1979. Mut-Ermenek-Silifke yöresinin jeolojisi ve petrol olanakları. *Bulletin of the Geological Society of Turkey* 22, 7–26 (in Turkish).
- Gutiérrez-Mosquera, H., Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Roy, P. D., & Rivera-Rivera, D. M. (2018). Metal concentrations in the beach sediments of Bahía Solano and Nuquí along the Pacific coast of Chocó, Colombia: A baseline study. *Marine pollution bulletin*, 135, 1–8, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.06.060
- Güven, K.C., Saygi, N., Öztürk, B., 1993. Survey of metal contents of Bosphorus algae, *Zostera marina* and sediments. *Botanica Marina* 36, 175 – 178, doi.org/10.1515/botm.1993.36.3.175
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research* 14, 975–1001, doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
- Karakaya, F., Yalcin, M. G., Narin, I., Tumuklu, A. 2010. The application of graded extraction on coastal sand (Tasucu coastal, south of Turkey). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 1, 165, Accession Number: WOS:000288623600022
- Kocak, M., Kubilay, N., Herut, B., Nimmo, M., 2005. Dry atmospheric fluxes of trace metals (Al, Fe, Mn, Pb, Cd, Zn, Cu) over the Levantine Basin: A refined assessment. *Atmospheric Environment* 39, 7330–7341, doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.010
- Ingram, R.L., 1970. *Procedures in sedimentary petrology*. Wiley, New York, pp 49–67
- Jonathan, M.P., Ram-Mohan, V., Srinivasalu, S., 2004. Geochemical variations of major and trace elements in recent sediments, off the Gulf of Mannar, the southeast coast of India. *Environmental Geology* (2004) 45,466–480, doi: 10.1007/s00254-003-0898-7
- Jonathan, M. P., Roy, P. D., Thangadurai, N., Srinivasalu, S., Rodríguez-Espinosa, P. F., Sarkar, S. K., ... & Muñoz-Sevilla, N. P., 2011. Metal concentrations in water and sediments from tourist beaches of Acapulco, Mexico. *Marine pollution bulletin*, 62(4), 845–850.
- Jonathan, M. P., Rodríguez-Espinosa, P. F., Sujitha, S. B., Shruti, V. C., & Martínez-Tavera, E., 2019. A multi-elemental approach to assess potential contamination in tourist beaches: The case of Loreto Bay (Marine Protected Area), NW Mexico. *Marine pollution bulletin*, 146, 729–740, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.083
- Leventeli, Y., 2011. Potential Human Impact on Coastal Area, Antalya—Turkey. *Journal of Coastal Research*, (61), 403–407, Accession Number: WOS:000306715200058
- Loring, D., 1991. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments, *ICES Journal of Marine Science* 48, 101–115, doi: 10.1093/icesjms/48.1.101
- Okay, N., Ergün, B., 2005. Source of the basinal sediments in the Marmara Sea investigated using heavy minerals in the modern beach sands. *Mar. Geol.* 216, 1–15, doi.org/10.1016/j.margeo.2005.01.006
- Okyar, M., 1991. The Late-Quaternary Transgression and its Associated Submarine Stratigraphy of Mersin Bay between the Goksu and the Seyhan Deltas: A Geophysical Approach. Ph.D. Thesis, Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University, Erdemli, Mersin, 156
- Okyar, M., Ergin, M., Evans, G., 2005. Seismic stratigraphy of Late Quaternary sediments of western Mersin Bay shelf, (NE Mediterranean Sea) *Marine Geology* 220, 113– 130, doi: 10.1016/j.margeo.2005.06.024
- Ozer, E., Koc, H., Ozsayar, T.Y., 2004. Stratigraphical evidence for the depression of the northern margin of the Menderes–Tauride Block (Turkey) during the Late Cretaceous, *Journal of Asian Earth Sciences* 22, 401–412., doi: 10.1016/S1367-9120(03)00084-1
- Ozdemir, Z., 2005. *Pinus brutia* as a biogeochemical medium to detect iron and zinc in soil analysis, chromite deposits of the area Mersin, Turkey. *Chemie der Erde* 65, 79–88, doi: 10.1016/j.chemer.2003.09.001
- Ozgul, N., 1971. Importance of block motions in structured development of the northern Middle Taurus. *Bull. Geological Soc. Turkey*, 14 (1), 85–101 (In Turkish).
- Ozgul, N., 1976. Some basic geological features of the Taurus Mountain. *Bull. Geological Soc. Turkey*, 19, 65–78 (In Turkish)
- Ozgul, N., Kozlu, H., 2002. Data on the Stratigraphy and Tectonics of the Kozan - Feneke Region (Eastern Taurides), *TAPG Bulletin* 14 (1), 1–36.
- Ramirez, M., Massolo, S., Frache, R., Correa, J.A., 2005. Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile. *Marine Pollution Bulletin* 50, 62–72, doi: 10.1016/j.marpolbul.2004.08.010
- Santhiya, G., Lakshumanan, C., Jonathan, M. P., Roy, P. D., Navarrete-Lopez, M., Srinivasalu, S., ... & Krishnakumar, P., 2011. Metal enrichment in beach sediments from Chennai Metropolis, SE coast of India. *Marine pollution bulletin*, 62(11), 2537–2542, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.08.019
- Sengor, A.M.C., 1987. Orojenik mozaiklerde yanal atım tektonisinin önemine bir örnek: İran ve çevresinin Mesozoyik tektonik evrimi. 7. Biannual Petroleum Congress of Turkey pp 50–64, (in Turkish).
- Sengor, A.M.C., Yilmaz, Y., 1981. Türkiye’de Tetis’in evrimi, levha tektoniği açısından bir yaklaşım. *TJK Yerbilimleri özel dizisi*, 1.
- Szefer, P., Glosby, G.P., Szefer, K., Penopkowiak, J., Kaliszan, R., 1996. Heavy metals pollution in surficial sediments from the southern Baltic sea of Poland. *Journal of Environmental Science and Health* 31A, 2723–2754, doi: 10.1080/10934529609376520

- Tasucu Municipality, 2005. <http://www.tasucu.bel.tr/bld/default.asp>
- Taylor, St.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications. Geoscience texts.
- Vetrimurugan, E., Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Roy, P. D., Sarkar, S. K., Rawlins, B. K., & Villegas, L. E. C., 2019. Comprehensive study on metal contents and their ecological risks in beach sediments of KwaZulu-Natal province, South Africa. *Marine pollution bulletin*, 149, 110555, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110555
- Vidinha, J.M., Rocha, F., Patinha, C., Silva, E., Andrade, C., 2006. Heavy metals contents on beach and dune sediments from Espinho to Mondego Cape (Portugal)—influence of human activities. *Journal of Geochemical Exploration* 88, 404– 407, doi: 10.1016/j.gexplo.2005.08.085
- Yalcin, M.G., Ilhan, S., 2008. Multivariate analyses to determine the origin of potentially harmful heavy metals in beach and dune sediments from Kizkalesi coast (Mersin), Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 81, 57–68, doi: 10.1007/s00128-008-9461-2
- Yalcin M.G., 2009. Heavy mineral distribution as related to environmental conditions for modern beach sediments from the Susanoglu (Atakent, Mersin, Turkey). *Environmental Geology*, doi: 10.1007/s00254-008-1499-2
- Yalcin, F., Nyamsari, D. G., Paksu, E., & Yalcin, M. G., 2016. Statistical assessment of heavy metal distribution and contamination of beach sands of Antalya-Turkey: an approach to the multivariate analysis techniques. *Filomat*, 30(4), 945-952, doi: 10.2298/FIL1604945Y
- Yalcin, M. G., Simsek, G., Ocak, S. B., Yalcin, F., Kalayci, Y., & Karaman, M. E., 2013. Multivariate statistics and heavy metals contamination in beach sediments from the Sakarya Canyon, Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 25(4), 2059-2066, doi: 10.14233/ajchem.2013.13309
- Yalcin, M. G., Coskun, B., Nyamsari, D. G., & Yalcin, F., 2019. Geomedical, ecological risk, and statistical assessment of hazardous elements in shore sediments of the Iskenderun Gulf, Eastern Mediterranean, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 78(15), 438, doi: 10.1007/s12665-019-8435-5
- Yalcin, F., 2020. Data Analysis of Beach Sands' Chemical Analysis Using Multivariate Statistical Methods and Heavy Metal Distribution Maps: The Case of Moonlight Beach Sands, Kemer, Antalya, Turkey. *Symmetry*, 12(9), 1538, doi.org/10.3390/sym12091538
- Yalcin, M. G., Cevik, O., & Karaman, M. E., 2013. Use of multivariate statistics methods to determine grain size, heavy metal distribution and origins of heavy metals in Mersin Bay (Eastern Mediterranean) coastal sediments. *Asian Journal of Chemistry*, 25(5), 2696-2702, doi: 10.14233/ajchem.2013.13683
- Yetis, C., Demirkol, C., 1986. Detail geological research of West side of Adana Basin I, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Technical report number 8037, Ankara, Turkey, 175 (in Turkish).
- Yoshinaga, J., Tanaka, A., Takamatsu, T., Morita, M., Okamoto, K., 1996. Element concentrations in NIES candidate marine sediment certified reference materials: reference values for major and trace elements. *Anal Sci* 12, 993–995, doi: 10.2116/analsci.12.993
- Zoller, W.H., Gladney, E.S., Gordon, G.E., Bors, J.J., 1974. Emissions of trace elements from coal fired power plants. In: Hemphill, D.D (Ed). *Trace substances in Environmental Health*, vol.8, Rolla, University of Missouri, Columbia, 167-172.



ARDGERMELİ BETONARME KÖPRÜ TABLİYESİNDE HALAT YERLEŞİMİNİN İRDELEMESİ VE EKONOMİK DEĞERLENDİRMELER

Mustafa TURAN*

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe/Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Köprü,
Betonarme,
Ardgerme,
Sonlu Elemanlar Yöntemi,
Halat Seçimleri

Öz

Ardgemeli beton teknolojisi, günümüz şartlarında, endüstriyel alanda sıkça kullanılan bir sistem haline gelmiştir. Özellikle, köprü üstyapı sistemlerinde, betonun sahip olduğu yüksek basınç mukavemetinden faydalanarak, çelik donatı ve halatlar yardımıyla betonun çekme gerilmeleri zaafını kapatmayı amaçlar. Bu çalışmada, köprü üstyapısı, sonlu elemanlar yöntemi metodu kullanan bilgisayar yazılımı ile modellenmiştir. Üstyapı tasarımlarına; daimi yükler, geçici yükler ve zamana bağlı yükler uygulanmıştır. Kesit gerilmelerini dengelemek amacıyla, öngerme halatları analiz modellerine yerleştirilmiştir. Seçilen halat düzeninin tasarıma etkileri kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, "en uygun" tasarıma ulaşmak adına halat kullanımı konusu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, neden-sonuç ilişkisi kapsamında değerlendirilmiştir. Sonuçların yönlendirmiş olduğu iki ana bulgu; ardgemeli köprü tabliyelerinde kullanılan öngerme kablolarının kesit gerilmelerini takip eden parabolik bir yörünge izlemesinin ve mümkün olduğunca daha büyük çaplı tüplerin içerisinden geçirilerek, kesit yüzeylerine yakınlaştırılmasının tesirleri karşılamak adına gereken toplam çelik halat metrajını düşüreceği saptanmıştır.

TENDON LAYOUT RESEARCH ON POST-TENSIONED CONCRETE BRIDGE DECK AND ECONOMIC EVALUATIONS

Keywords

Bridge,
Concrete,
Post-Tensioned,
Finite Element Analysis,
Tendon Usage.

Abstract

In recent years, post-tensioned concrete technology has become widely used one in bridge engineering. Post tensioning system aims to use the high compressive strength of concrete and helps to resist on tension stresses with tendons and reinforcements. The aim of this paper is to study on finite element analysis of two-span post-tensioned concrete bridge decks and tendon usage. Bridge is 2-span and superstructure type is voided slab. Permanent, transient and time-dependent loading types were considered. To balance the deck section stresses, prestressing tendons were used. By iterations, post-tensioned tendons layout and types were studied. Two main results have been found that a parabolic trajectory tracing following sectional stresses of prestressing cables used in post-tensioned bridge decks and passing them through tubes of larger diameter as possible will decrease the required amount of tendon usage.

Alıntı / Cite

Turan, M., (2020). Ardgemeli Betonarme Köprü Tabliyesinde Halat Yerleşiminin İrdelemesi ve Ekonomik Değerlendirmeler, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1126-1137.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Turan, 0000-0002-4601-8041

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.04.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.12.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.09.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Beton ve çelik malzemelerinin uyum içerisinde kullanımları, yapı mühendisliğinde en sık kullanılan sistemdir. Bu sistemi bir adım daha öteye götürmek adına birçok teknolojik yöntem geliştirilmiştir. Ön germe teknolojisi de

* İlgili yazar / Corresponding author: mustafa.turan.ce@gmail.com, +90-531-960-74-96

sistemi bir adım öteye götürmek adına geliştirilen öncü teknolojilerdendir. Ön germe sayesinde, betonun sahip olduğu yüksek basınç mukavemeti ön plana çıkartılır. Sistemi basınç altında tutarak, betonun çekme kapasite zaafı gizlenmiş olur.

Çalışma kapsamında, ardgermeli beton tabliye içerisinde konumlandırılması planlanan ön germe kabloları irdelenmiştir çünkü sistemi doğrudan etkileyen en etkin parametre halat seçimleridir. Kesit boyutlandırması, donatı seçimi, sehim oranları, tabliye kesit gerilmeleri gibi bir çok önemli konu, halat seçimlerinin devamında geliştirilir. Köprü üstyapı sistemi sonlu elemanlar yazılımı ile hazırlanmıştır. Üstyapı ağırlığının azaltılması amacıyla, açıklık bölgelerinde boşluklu kesitler tercih edilmiştir. Mesnet bölgelerinde ise kesme gerilmelerini karşılamak amacıyla daha büyük beton kesit alanlarına ihtiyaç duyulmuştur ve dolu kesitler tercih edilmiştir. Analiz geometrisi çubuk elemanlar yardımıyla hazırlanmıştır ve mesnet koşulları, bağlantı elemanları yardımıyla, gerçek mekanik özellikleri ile ifade edilmiştir. Kalıcı, geçici ve zamana bağlı yüklemeler hazırlanmıştır. Halat yerleşimleri, kesitlerde oluşan gerilmeleri karşılayacak formatta; açıklıklarda alt liflere, mesnet bölgelerinde ise üst liflere yakın bölgelerden yürütülmüştür. Yapılan çok sayıda analizler neticesinde; farklı sayıda halat kullanımının, kesit gerilmelerine olan etkileri incelenmiştir. Halatların içerisinde bulunan çelik demetler ve halatların içerisinde geçeceği tüp seçiminin farklı alternatifleri kıyaslanmıştır. Analizler neticesinde, tasarımcıyı en iyi ürüne götürmeyi amaçlayan değerlendirmeler sunulmuştur.

2. Bilimsel Yazın Taraması (Scientific Literature Review)

Freyssinet, (1928), ardgermeli beton fikrini ilk olarak geliştirmiş ve bir yıl sonrasında bir uygulamasını hayata geçirmiştir. Fikrin gelişimi ve araştırmalar günümüzde de halen devam etmektedir.

Williams ve Waldron (1989), ardgermeli beton elemanların davranışı konusunda deneysel çalışmalar sunmuştur. Kim ve Lee (2012), nümerik ve teorik modeller geliştirerek, enjeksiyonlu veya enjeksiyonsuz ardgermeli beton konusunu araştırmışlardır. İki durum arasındaki kullanım farklılıklarını ortaya çıkarmışlardır. Lineer olmayan analizler yardımıyla, moment dağılımları incelenmiştir.

Fanning (2001), sıkça kullanılan sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS ile, ardgermeli giriş tasarımı konusunda çalışmalar ortaya koymuştur.

Optimizasyon konusunda da bir çok akademik araştırma yapılmıştır. Tasarımın en önemli kısmı olarak optimum şartlara ulaşım amaçlanmıştır. En iyi çözümü yakalamak, tasarımcıyı kaynakları en efektif şekilde kullanmaya yönlendirecektir. Her tasarımcının kendine göre izlediği bir rota vardır ancak tümünü tek seferde değerlendirip, en iyi tasarımı yakalamak en önemlisidir. Bu bağlamda, en yüksek tasarım performansına ulaşım konularında; en makul kesitlerin seçimi, uygun malzemelerin tercihi ve uygun fiyatlandırma politikası önem arz etmektedir. Bahsi geçen konulara sıkça vurgu yapılmıştır ve yönlendirici sonuçlar sunulmuştur. (Amir, 2013; Kumar, 2014, Atabay & Gulay, 2009)

Halat seçimi konusunda en iyiye yönlendirme konusunda çeşitli araştırmalar hazırlanmıştır. (Ranzi & Ostinelli, 2017; Hussien, 2012; Utrilla & Samartin, 1997; Ghallab, 2013; Marks & Trochymiak, 1991)

Köprülerde kullanılan ardgerme teknolojisi hali hazırda gelişmekte olan bir sistemdir. Yapılan çeşitli araştırmaların ışığında, yapılması gerekli olan, tasarımcıyı daha iyiye yönlendirebilecek çok fazla parametre vardır. Bu çalışma kapsamında da halat ve tüp seçimlerinin önemine dikkat çekilmek istenmiştir. Sonuçlarda görüleceği üzere, tasarımın sebep olacağı ekonomik yük, tasarımcı seçimlerine göre, önemli derecede farklılıklar gösterecektir.

3. Öngerme Tekniği (Prestressing Method)

Öngerme fikrinin M.Ö. 2700 yıllarında ortaya koyulduğu çeşitli kaynaklara göre varsayılmaktadır. İlk olarak ahşap, taş gibi bazı basit malzemelerin basınç altında tutularak kullanılması, fikrin taslağını oluşturmaktadır. Beton içerisinde kullanılma düşüncesi ise ilk olarak 19. yy. sonlarında Amerikalı bir mühendis tarafından geliştirilmiş ve patent almıştır.

Öngerme fikri yapım metodu olarak; ön çekim ve ard çekim olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Ön germe, ön çekim tekniğinde, kablo yerleşimi ve gerilme kuvvetler beton dökümünden önce yapılır. Ard çekim tekniğinde ise beton belirli bir mukaveme ulaştıktan sonra kablolar gerilir ve sisteme ters sehim uygulanır. Bu çalışma kapsamında, ön germeli, ard-çekim sistemine ait köprü tabliyesi irdelenecektir.

Ardgermeli beton kullanımı ile daha uzun açıklıktaki köprüleri, daha makul kesit boyutlandırmaları ile tasarlanabilir. Kesit ölçülerinin narinleştirilmesi köprüye hem ekonomi hem de görünüş konusunda estetik getirmektedir. Ayrıca, boyutlandırmada yapılacak kazanım, ekonomik olarak da olumlu geri dönüş sağlayacaktır. Bilinen konvansiyonel yapıların aksine ardgermeli beton sisteminde tasarımı etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Tasarımcı için en uygun tasarıma ulaşmak, daha önceki basit tasarımlara kıyasla çok daha zordur. Sonuç olarak, en iyi tasarıma ulaşmak için çok sayıda hesap adımları değerlendirilmelidir.

4. Köprü Model Analizi (Bridge Mathematical Analysis)

4.1. Tasarım Tarifi (Design Description)

Çalışma kapsamında, hesap açıklığı 2 x 32,00 m. olan köprü sisteminin üstyapı analizi hazırlanmıştır. Köprü üstyapı sistemi; yerinde dökme ard-germe boşluklu betonarme tabliyedir. Tabliye genişliği 10,00 m, derinliği ise 1,20 m'dir. Üstyapı sisteminin hafifletilmesi amacıyla açıklık ortalarında boşluklu kesit tercih edilmiştir. Boşluklu kesit; 6 adet 0,70 cm çapında borular yardımıyla hazırlanmıştır. Tabliye alt ve üst kesit kalınlığı 25 cm ve orta duvar kalınlığı 30 cm olarak tasarlanmıştır. Kenar ayak ve orta ayak mesnet bölgelerinde ise dolu kesitli tabliye tercih edilmiştir.

Tabliye kenarlarda; 2 x 1,50 m yaya yolu, ortada ise 2 şerit kapasitesine sahip 7,00 m yol genişliği mevcuttur. Yol üst yapısı kalınlığı 6,00 cm olarak belirlenmiştir. Oto korkluk ve yaya korkuluk yerleşimleri ile yaya ve sürücü açısından gerekli güvenlik önlemleri alınmıştır.

4.2. Tasarım Kriterleri (Design Criteria)

Yapı tasarımları "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007 SI" ye uygun olarak yapılmıştır.

4.3. Mühendislik Yazılımı (Engineering Software)

Sonlu elemanlar yöntemi yazılımı için Midas Civil, 2019 (v2.1) programı kullanılmıştır. Program, inşaat mühendiliği alanında hazırlanacak olan tüm yapı sistemlerinin tasarımında ve analizinde kullanılmaktadır. Özellikle köprü mühendisliği alanında, uluslararası platformda kabul görmüş bir yapı analizi programıdır. İki boyutlu ve üç boyutlu, kompleks yapıların geometrik modellemesi, yüklemesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerin tamamlanması mümkündür. Ayrıca, farklı şartnamelerin gereksinimlerine göre hareketli yük modelleri sunuyor oluşu, köprü sisteminin dünyanın çeşitli ülkelerindeki karayolu / demiryolu yük sınıflarına göre değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

4.4. Malzeme Bilgisi (Materials)

Analizlerde kullanılacak olan malzeme sınıfları aşağıdaki tablolarda sunulmaktadır;

Tablo 1. Beton Özellikleri (Concrete Properties)

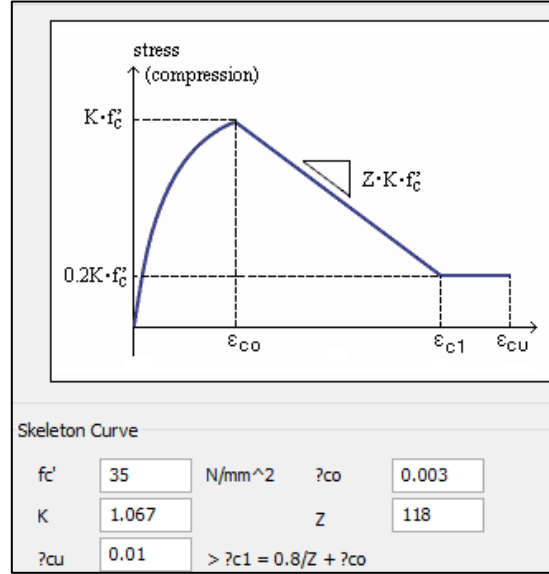
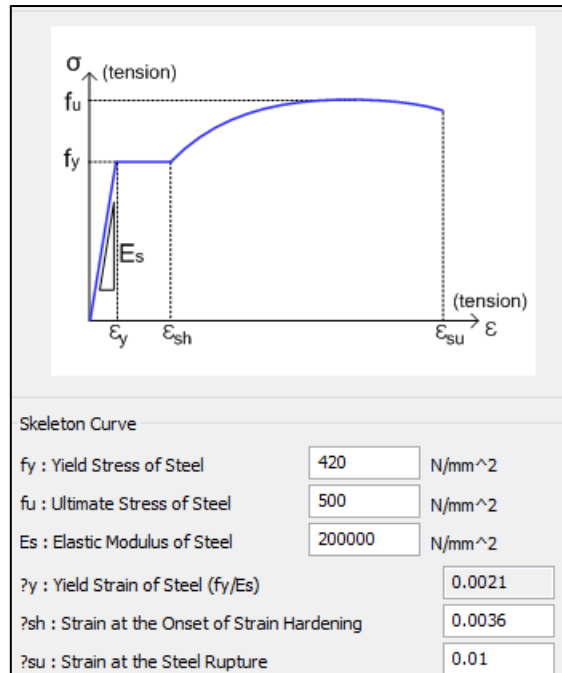
Tabliye Beton Sınıfı	C35/45
28 Günlük Silindirik Basınç Dayanımı	35 MPa
Elastik Modül, E_c	34000 MPa
Birim Ağırlık	25 kN/m ³
Poisson Oranı	0,20
Isıl Genleşme Katsayısı	1,00 E-5 /°C

Tablo 2. Donatı Çeliği Özellikleri (Steel Properties)

Akma Dayanımı	420 MPa
Elastik Modül, E_s	200000 MPa

Tablo 3. Ön Germe Çeliği Özellikleri (Prestressing Steel Properties)

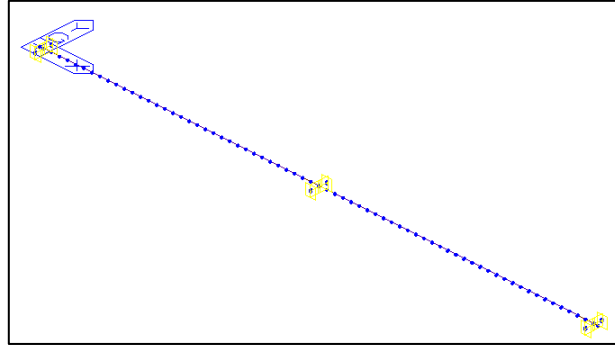
Halat Çekme Dayanımı, f_{pu}	1860 MPa
Elastik Modül, E_s	200000 MPa
Akma Dayanımı, f_{py}	1674 MPa
Öngerme Kuvveti ($0.75 \times f_{pu}$)	1395 MPa
Sürtünme Katsayısı	0.18
Titreşim Katsayısı (Wobble)	0.002 m^{-1}
Halat Alanı	150 mm^2
Ankraj Oturması	0.006 m
Birim Ağırlık	1,18 kg/m

**Şekil 1.** Beton Gerilme-Deformasyon Grafiği (Concrete Stress-Strain Graph)**Şekil 2.** Çelik Gerilme-Deformasyon Grafiği (Concrete Stress-Strain Graph)

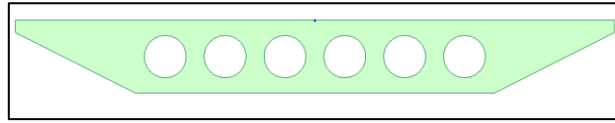
4.5. Modelleme Metodolojisi (Methodology)

- Üstyapı model metodu çubuk elemanlar tanımlamasıyla hazırlanmıştır.
- Üstyapı tanımlamasında; dolu kesit ve boşluklu kesit olmak üzere iki farklı kesit tanımlaması hazırlanmıştır.

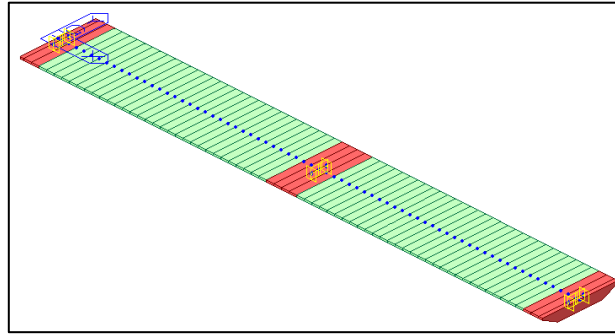
- Köprü üst yapısı basit elastomer mesnetler ile alt yapı üzerine konumlandırılacak şekilde düzenlenmiştir. Her aksta 2 adet mesnet kullanılmıştır. Mesnetler; yatay ve düşeyde gerçek etki noktasına göre hesap modelinde tanımlanmıştır ve geometrik özelliklerine mekanik özellikleri hesaplanarak, programda tanımlanmıştır. Mesnet ile tabliye arasındaki geçişler, rijit bağlantı elemanları ile tanımlanmıştır.
- Düğüm noktaları lokal eksenleri ile global eksenler aynı doğrultularda olacak şekilde ayarlanmıştır.
- X yönü köprü boyuna yön, Y yönü köprü enine yön ve Z yönü düşey yönü ifade etmektedir.
- Bütün elemanlar, merkez-üst noktalarından tanımlanmıştır.



Şekil 3. Çubuk Analiz Görüntüsü (Frame Analysis View)



Şekil 4. Boşluklu Tabliye Kesiti (Voided Slab Section)



Şekil 5. Donatılmış Analiz Görüntüsü (Filled Analysis View)

4.6. Yapıya Etkiyen Yükler (Loads on Structure)

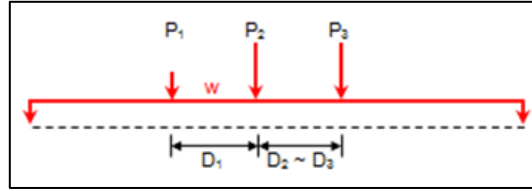
4.6.1. Daimi Yükler (Dead Loads)

Zati Yükler (DC), Tabliye kesitleri için hesaplanacak olan zati yükler, analiz programı içerisinde tanımlanmıştır. İlave Zati Yükler (DW), Kesit öz ağırlıkları haricinde uygulanması planlanan ilave zati yükler (asfalt, kaldırım ve korkuluklar) harici yük tanımı ile kesitlere uygulanmıştır. Ön Germe Kuvvetleri (PS), Ön germe halatları 1395 MPa kuvvetle, halatın her iki ucundan eş zamanlı gerdirilecek şekilde tasarlanmıştır.

4.6.2. Geçici Yükler (Transient Loads)

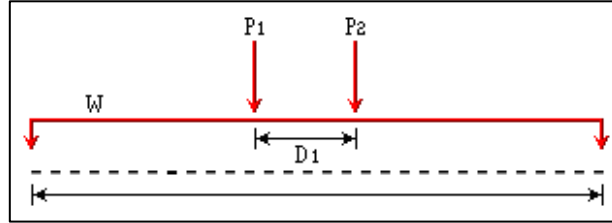
Köprü hareketli yük analizlerinde kullanılacak olan tasarım aracı "HL-93" yük modelidir. HL-93 yük modeli iki farklı yükleme modeli içermektedir. Birinci yükleme modeli, taşıta ait dingil yüklerinin kullanıldığı "tasarım kamyonu" yüklemesidir. İkinci yükleme modeli ise dingil yüklerinin eşdeğer bir şerit yüklemesine dönüştürüldüğü "tasarım dingil yükü" uygulamasıdır. İki bağımsız yükleme şekli yapıya ayrı ayrı uygulanarak, en kritik kesit tesirlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tasarım kamyonu; ön dingil yükü 35 kN, arka iki dingil yükü ise 145 kN'dur. Ön dingiller arası mesafe 4300 mm iken arka dingiller arası mesafe, en kritik durumu oluşturacak şekilde 4300 mm ~ 9000 mm mesafeleri arası değişmektedir.



Şekil 6. Tasarım Kamyonu Yük Modeli (Design Truck Load Model)

Tasarım dingil yükü; 110 kN büyüklüğünde 2 adet noktasal yükün 1200 mm aralıklarla yerleştirildiği bir yükleme şemasıdır. İlave olarak, aşağıdaki şemada "W" olarak ifade edilen 9,34 N/mm büyüklüğünde yayılı yük sisteme dahil edilir.



Şekil 7. Tasarım Dingili Yük Modeli (Design Lane Load Model)

Yapı üzerindeki toplam şerit sayısı 2'dir. Şartname uyarınca 2 şeritli sistemler için yük azaltma katsayısı "1" olarak uygulanacaktır. Ayrıca, dinamik yük artırma faktörü "1,33" olarak şartname gereğince kullanılmıştır.

Yaya Yükü (PL)

Köprü üzerinde 2 adet 1,50 m genişliğinde yaya kaldırımı bulunmaktadır. Analiz modelinde kaldırım sınırları belirlenerek, şartname uyarınca ilgili yük kombinasyonu ile 3,6 kN/m² köprü boyunca yayılı yük olarak uygulanmıştır.

Merkezkaç Yükü (CE)

Merkezkaç kuvveti, kurbta olan köprü yerleşimlerinde, eksen yarı çapına ve araç hızına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Analizi gerçekleştirilen yapı sisteminde ise köprü eksenini kurbta olmadığı için merkezkaç kuvveti meydana gelmeyeceği tespit edilmiş olup ilave yük durumu uygulanmamıştır.

Fren Yükü (BR)

Aşağıda tanımlanan iki kombinasyondan büyük olanı fren yükü olarak kullanılmıştır;

- Tasarım kamyonu veya tasarım dingil yükü diziliminin yüzde 25'i,
- Tasarım kamyonu veya tasarım dingil yükü diziliminin toplamının yüzde 5'i.

Rüzgar Yükü (WS, WL)

Rüzgar yükü etki alanı; yapının kendisine ve hareketli yüke olmak üzere 2 başlıkta irdelenecektir.

4.6.3. Zamana Bağlı Yükler (Time Dependent Loads)

Sistemin Sıcaklık Değişimi (TU)

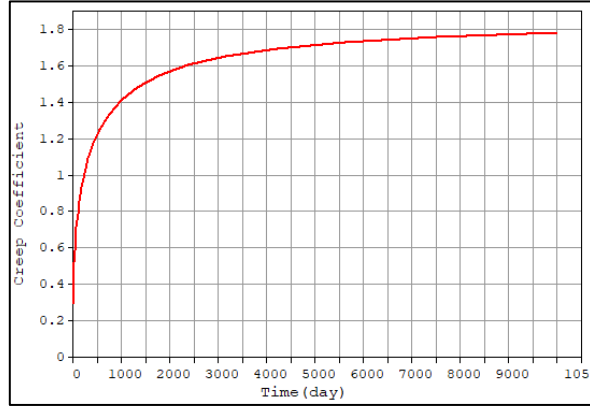
Yukarıdaki tanımlanan hesap modeli için +30°C ve -15°C derece sıcaklık değişimleri tanımlanmıştır. Ayrıca tabliye betonunun +10°C sıcaklıkta döküleceği düşünülerek analiz modeli başlangıç sıcaklığı belirlenmiştir.

Isıl Gradyan (TG)

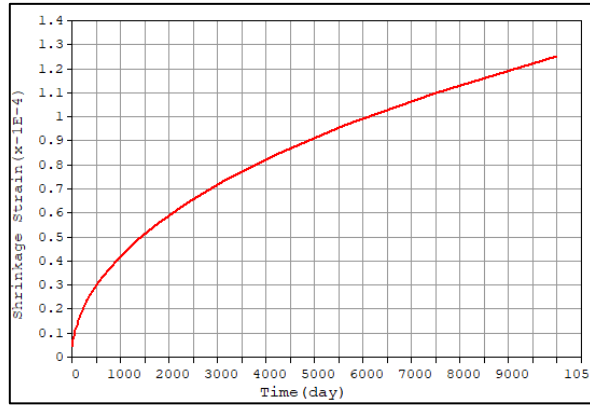
Sistem sıcaklığının değiştirilmesi dışında kesit yüksekliği boyunca değişken sıcaklıklar tanımlanmıştır. Kesit alt yüzeyi ve üst yüzeyi, kesit gövdesinden farklı olarak artı ve eksi 10 °C farklarla kontrol edilmiştir.

Sünme & Büzülme (CR, SH)

Birim deformasyonlar "CEB-FIP Model Code 1990" a uygun olarak hesaplanacaktır. Etkilerin 10 gün – 10000 gün arası gelişmesi beklenerek, 24 zaman adımında, zamana bağlı sünme ve büzülme katsayıları grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 8. Sünme Katsayısı Grafiği (Creep Coefficient Graph)



Şekil 9. Büzülme Katsayısı Grafiği (Shrinkage Coefficient Graph)

4.7. Yük Kombinasyonları (Load Combinations)

AASHTO LRFD (2007) şartnamesi uyarınca oluşturulan yük birleşimleri aşağıda özetlenmiştir;

Servis Durumu Yük Kombinasyonları

- Servis 1: 1.0DC + 1.0DW + 1.0LL + 1.0BR + 1.0PL + 0.3WS + 1.0WL + 1.0 TU + 0.5TG
- Servis 2: 1.0DC + 1.0DW + 1.3LL + 1.3BR + 1.3PL + 1.0 TU
- Servis 3: 1.0DC + 1.0DW + 0.8LL + 0.8BR + 0.8PL + 1.0 TU + 0.5TG
- Servis 4: 1.0DC + 1.0DW + 0.7WS + 1.0 TU + 1.0TU

Dayanım Durumu Yük Kombinasyonları

- Dayanım 1: 1.25DC + 1.5DW + 1.75LL + 1.75BR + 1.75PL + 0.5 TU + 0.5TG
- Dayanım 2: 1.25DC + 1.5DW + 1.35LL + 1.35BR + 1.35PL + 0.5 TU + 0.5TG
- Dayanım 3: 1.25DC + 1.5DW + 1.40WS + 0.5 TU + 0.5TG
- Dayanım 4: 1.50DC + 1.50DW + 0.5 TU
- Dayanım 5: 1.25DC + 1.5DW + 1.35LL + 1.35BR + 1.35PL + 0.4WS + 1WL + 0.5 TU + 0.5TG

Kısaltmalar

- DC = Zati ve ilave kalıcı yükler
- DW= Asfalt yükü
- LL = Hareketli yükler
- PL = Yaya yükler
- BR= Fren yükü
- WS = Tabliye üzerindeki rüzgâr yükü

- WL = Hareketli yük üzerinde etkiyen rüzgâr yükü
- TU = Sistem sıcaklık değişimi
- TG = Isıl gradyan

4.8. İzin Verilen Kesit Gerilmeleri (Allowable Section Stresses)

Basınç Gerilmeleri

İnşaat Aşaması : $0.45f_c' = 15.75 \text{ MPa}$

Servis Aşaması : $0.60f_c' = 21.00 \text{ MPa}$

Çekme Gerilmeleri

İnşaat aşaması : $0.50\sqrt{f_c'} = 2.95 \text{ MPa}$

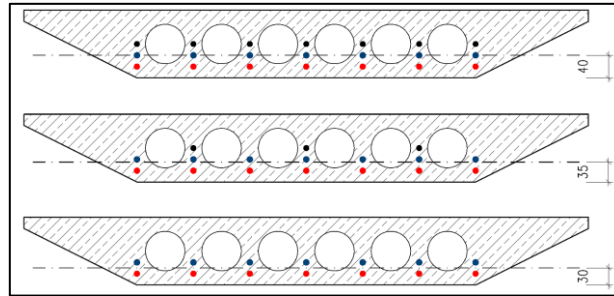
Servis aşaması : $0.50\sqrt{f_c'} = 2.95 \text{ MPa}$

4.9. Halatların Modellenmesi (Modelling Strands)

Köprü tabliyesinde meydana gelecek olan gerilmeleri dengelemek ve düzenlemek amacıyla kesite ard-germe halatları yerleştirilmiştir. Kullanılan halatların, tabliye boyunca oluşması muhtemel gerilme dağılımını en uygun şekilde dengelemesi amaçlanmıştır. Bu hususta, halat yerleşimi yatayda ve düşeyde optimize edilerek, en etkili olduğu konumlarda kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında, aşağıda detayları sunulan 3 farklı halat yerleşimi hazırlanmıştır;

- Analiz 1: Yatayda, düşeyde 7 x 3 adet, toplam 21 adet halat kullanılmıştır.
- Analiz 2: Yatayda 7, düşeyde ise sırasıyla 2 ve 3 adet olmak üzere toplam 17 adet halat kullanılmıştır.
- Analiz 3: Yatayda, düşeyde 7 x 2 adet, toplam 14 adet halat kullanılmıştır.



Şekil 10. Köprü Halat Yerleşimleri (Bridge Strand Layout)

Analiz kapsamında seçilen halat sayılarını ve karelajını çeşitlendirmek mümkündür. Ancak, statik analizler ile kesit gerilmeleri, deplasman limitleri vb. şartları yerine getirmek tek başına yeterli olmayacaktır. Şartname tarafından sunulan geometrik kısıtlamaların da yerine getirilmiş olması gerekmektedir. Halatların içerisinde yürütüleceği tüpün çapı, tüp alanının çelik halat kesit alanına oranı gibi birkaç kontrolün de yapılması gerekmektedir. Yukarıda izah edilen teknik konuların yanında ise yapının imalatının yapılacağı bölge ve ilgili bölgeden ürün temin edilebilecek üretici firmaların katalog bilgileri de halat seçimleri için büyük önem arz etmektedir.

Özetle, seçilen halat sayısı teknik ve teknik olmayan birçok parametreye bağlıdır. Çalışma kapsamında hazırlanan 3 farklı analiz tipi ise kesit gerilmelerinin kontrol edildiği iterasyonlar neticesinde seçilmiştir. Ayrıca, şartname tarafından sunulan geometrik kısıtların yerine getirilmiş oluşu da Bölüm 4.13'te kontrol edilmiştir.

4.10. Analiz Çıktıları (Analysis Output)

Yapılan 3 farklı tip halat yerleşimlerine göre, 1 halatta bulunması gerekli çelik demet sayısı konusu irdelenmiştir. Beklendiği üzere, halat sayısı azaldıkça, 1 adet halatın içeriğini oluşturan çelik demet kesit alanı artmıştır. Tabliye kesitlerinde oluşan basınç ve çekme gerilme değerleri, izin verilen kapasite limitleri ile değerlendirilerek, her analiz tipi için gerekli olan halat metrajları hazırlanmıştır.

Aşağıdaki tabloda 3 farklı analize ait halat kullanım karelajı ve karelaja ait toplam çelik halat metraj bilgileri hazırlanmıştır. Kesit gerilmelerini dengeleyebilecek halat miktarı aşağıdaki tablodan da izleneceği üzere Analiz 1'de en yüksek, Analiz 3'te ise en düşük mertebelerde hesaplanmıştır.

Tablo 4. Çelik Halat Metrajı (Steel Strand Quantity)

	Halat	Adet	Alan	Birim Ağırlık	Toplam
			(mm ²)	(kg/m)	(kg)
1	21x21	441	66150	1,18	35906,22
2	17x25	425	63750	1,18	34603,50
3	14x27	378	56700	1,18	30776,76

Yapılan analizlerin esas amacı çelik halat kullanımını irdelemek olduğu için tüm analizlerde aynı beton kesit kullanılmıştır. Açıklık ve mesnet bölgelerine ait boş ve dolu kesitler değerlendirilerek Tablo 5 elde edilmiştir.

Tablo 5. Beton Metrajı (Concrete Quantity)

Boşluklu Kesit		Dolu Kesit		Toplam
Uzunluk	Alan	Uzunluk	Alan	Beton Hacmi
(m)	(mm ²)	(m)	(mm ²)	(mm ³)
7,76	60	10,00	9	555,60

4.11. Özet Bilgiler (Summary Information)

Yapılan 3 tip analiz neticesinde gerekli olan halat sayıları ve 1 adet halatta bulunması gerekli olan çelik demet sayıları hesaplanmıştır. Ön germe çeliği metrajı ve beton metrajının birlikte değerlendirilmesi sonucu elde edilen özet tablo aşağıda sunulmaktadır;

Tablo 6. Gerekli Halat Sayıları ve Metrajları (Required Strand and Quantity)

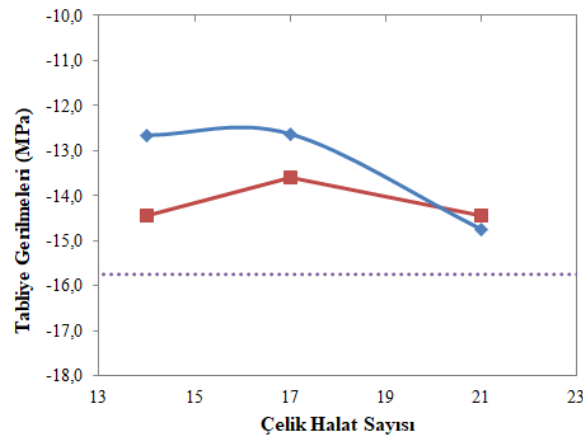
Analiz Adımı	Halat Sayısı	Çelik Demet Sayısı	Halat Metrajı (kg/m ³)
Adım 1	21	21	64,63
Adım 2	17	25	62,28
Adım 3	14	27	55,39

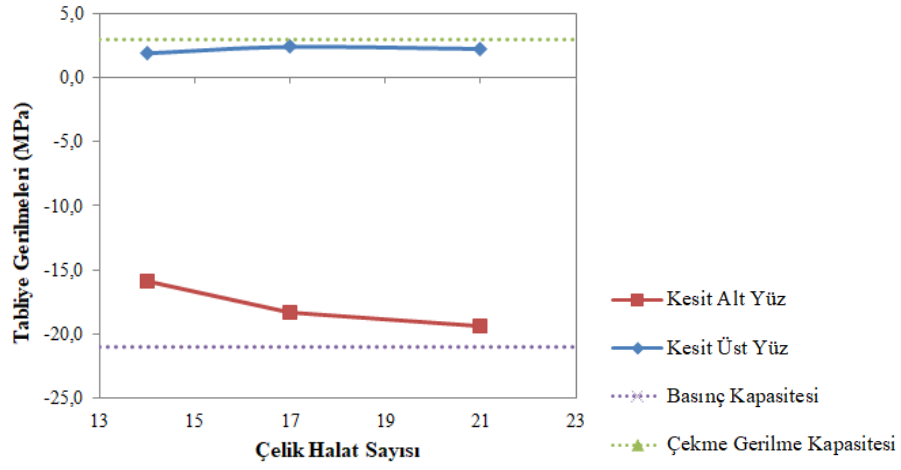
Tabliye kesitlerinde meydana gelen gerilmeler ise izin verilen kapasite limitleri ile kıyaslanarak, kesit gerilmeleri açısından problem oluşmadığı teyit edilmiştir. Bölüm 4.12’de sunulacak olan analiz sonuç görüntülerinde inşaat aşaması ve servis aşamasında elde edilen tabliye alt yüz & üst yüz kesit gerilmeleri gösterilmiştir.

4.12. Değerlendirmeler (Evaluations)

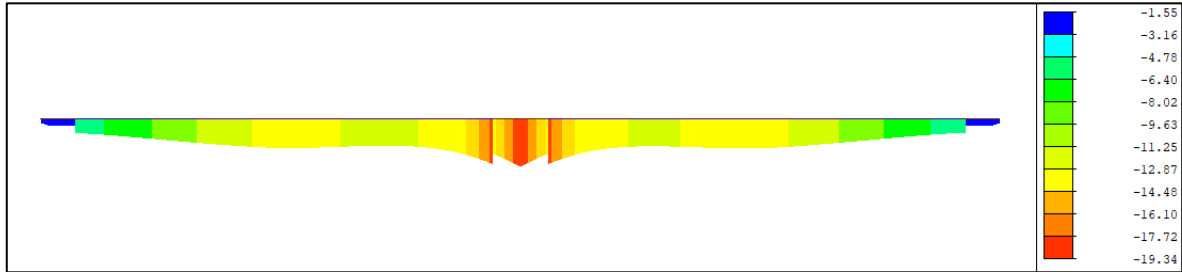
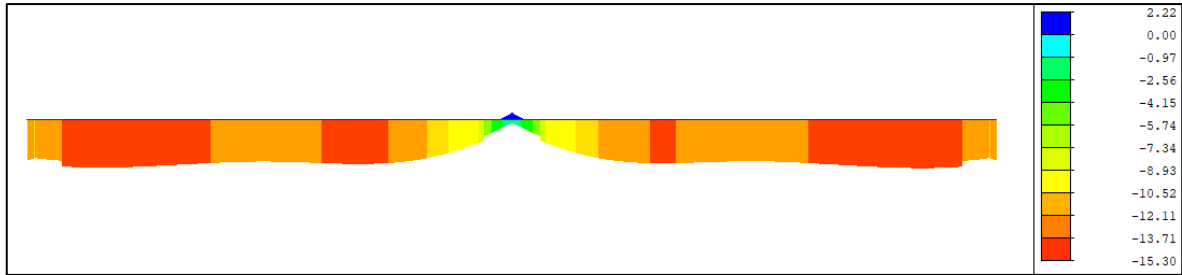
Adım 3 analizinde, aynı tabliye kesitinin gerilme güvenliği, daha az halat metrajı ile sağlanmıştır. Daha az sayıda halat kullanılarak daha efektif bir çözüm elde edilmiş olmasının sebepleri irdelendiğinde 2 önemli husus tespit edilmiştir; halat merkezlerinin tarafsızlık eksenine olan mesafesi ve zamana bağlı kayıplar.

Aşağıda sunulan grafiklerde tüm adımlarda elde edilen kesit gerilmeleri ve kapasite çizgileri gösterilmiştir. Sonuç olarak, tüm adımlarda seçilen halatların, izin verilen limitleri aşmadığı gösterilmiştir.

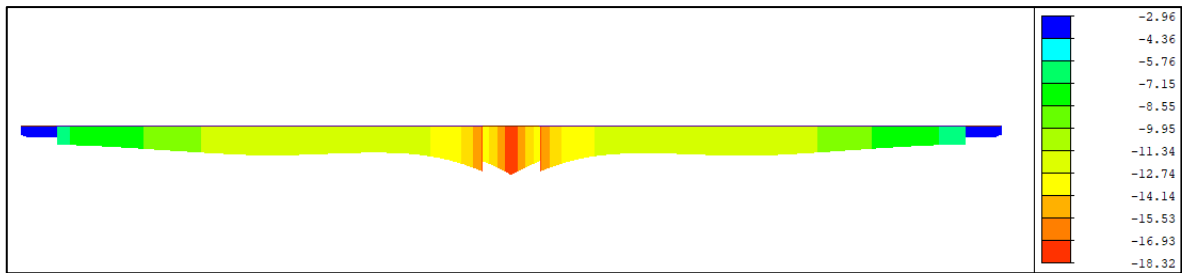
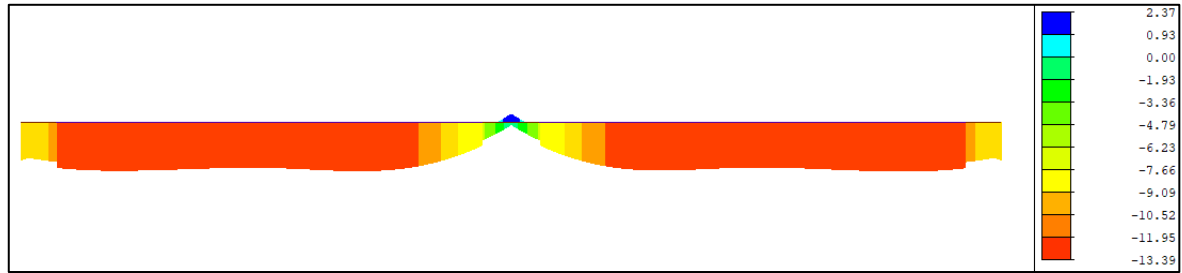
**Şekil 11.** İnşaat Aşaması Kesit Gerilmeleri (Construction Stage Stresses)



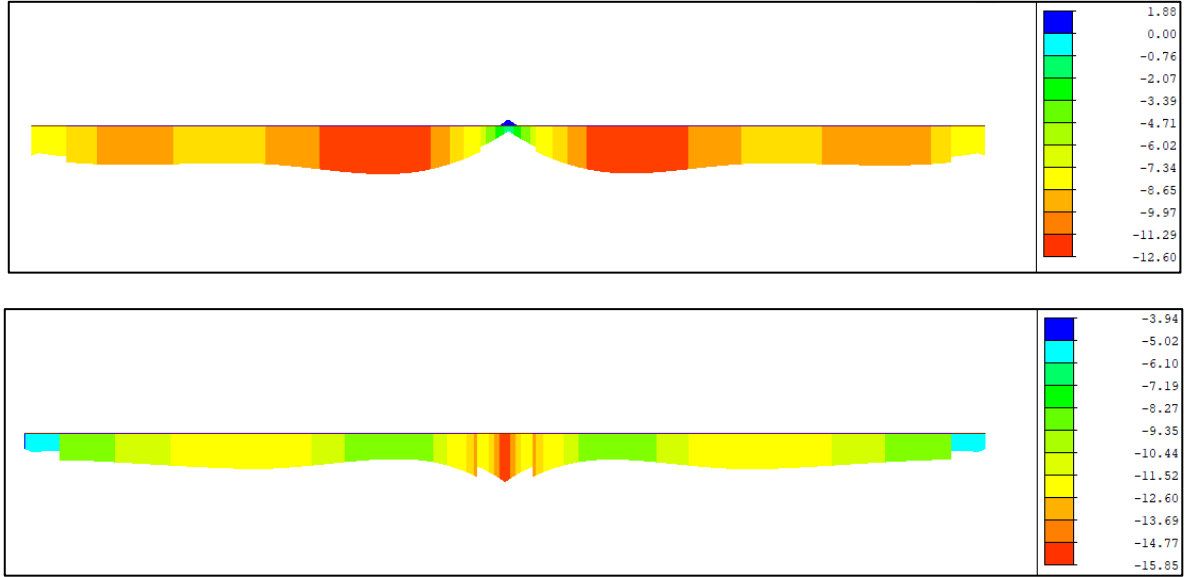
Şekil 12. Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (Service Stage Stresses)



Şekil 13. Analiz 1, Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (MPa) (Analysis 1, Service Stage Stresses)



Şekil 14. Analiz 2, Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (MPa) (Analysis 2, Service Stage Stresses)



Şekil 15. Analiz 3, Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (MPa) (Analysis 3, Service Stage Stresses)

4.12.1. Halat Merkezlerinin Tarafsızlık Eksenine Olan Uzaklığı (Distance between strand centroid and section neutral axis)

Ön germe halatlarının ağırlık merkezlerinin, kesit yüzeylerine olan mesafeleri, gerilme karşılama kapasitelerini ciddi oranda değiştirmektedir. Tabliye boyut kesiti boyunca belirlenen halat yörüngesi, elde edilen kesit gerilmelerini takip etmektedir. Açıklık ortalarında, mümkün olduğunca alt yüzeye yakın, orta ayak aks bölgesinde ise mümkün olduğunca üst yüzeye yakın geçmektedir. Adım 1’de hazırlanan şemaya göre 3 sıra halatın merkezinin yüzeye mesafesi 40 cm, Adım 2’de 35 cm ve Adım 3’te ise 30 cm olarak belirlenmiştir. Bu durumda, en etkili halat yerleşim düzeni Adım 3’e aittir. Tüm adımlara ait şematik gösterim aşağıdaki grafikte sunulmaktadır;

Halatları birbirlerine daha fazla yaklaştırmak ve hatta birbirlerine bağlamak da ayrıca mümkün. “Bundled” adı verilen işlemlerde halatlar birbirlerine her 900 mm adımlarda ankre edilebilir. En fazla 3’er li gruplar halinde hazırlanabilir. İki farklı grup arası mesafe yatayda 100 mm ve düşeyde 38 mm yakınlıkta olabilir.

4.12.2. Zaman Bağlı Kayıplar (Time Dependent Losses)

Zamana bağlı kayıplar; elastik deformasyon, sünme/büzülme ve gevşeme kaybı noktalarında incelenmiştir. Adım 1’den Adım 3’e doğru gidildiğinde halatlarda, meydana gelen kayıplar ciddi oranlarda azalmaktadır. Elastik deformasyon kayıpları incelendiğinde, kayıplarda meydana gelen azalmalar sırasıyla; % 30,44 ve % 31,63 mertebelerindedir. Sünme/büzülme ve gevşeme kayıpları tasarımı etkileyecek derecede farklılık göstermemektedir. Sonuç olarak, tüm kayıplardan sonra oluşan gerilmelerin ilk kayıplardan sonra oluşan gerilmelere oranı 3 adım için farklılık göstermektedir. Büyük oranda elastik deformasyonun sebep olduğu farklılık neticesinde Adım 3 analizinde meydana gelen kayıplar daha azdır. Bu durumun sonucu olarak, Adım 3 analizi daha efektif çalışmaktadır.

4.13. Halat Yerleşimi ile İlgili Kısıtlamalar (Strand Layout Rules)

Bir önceki bölümde keşfedildiği üzere, halat sayısının azaltılması ve buna karşın 1 adet halatın içerisindeki çelik demetinin adetinin artırılması, tasarımı daha ekonomik hale getirmektedir. Ancak, hangi aşamaya kadar bu çözümün yapılması ayrıca araştırılmıştır. Bir başka deyişle, kesitteki halat sayısı ne kadar azaltılabilir veya 1 adet halat en fazla kaç demetten oluşturulabilir sorularına ait kısıtlamalar, şartnamenin ilgili bölümlerinde araştırılmıştır.

Şartname tarafından sunulan bilgiler ışığında, çoklu halat sistemlerinde, halat tüpüne ait kesit alanı, tüpün içerisinden geçirilecek çelik demetlerin toplam alanının en az 2 katı kadar olmalıdır. En fazla demet alanı kullanılan Adım 3’e ait kontrol aşağıda sunulmaktadır;

Halat Tüpü Çapı: 120 mm
 Halat Tüpü Alanı: 11309 mm²
 27 Demet Çelik Halat Alanı: 4050 mm²

$$11309 \text{ mm}^2 > 2 \times 4050 = 8100 \text{ mm}^2$$

Sonuç, seçilen halat tüpü çapı yeterlidir.

5. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Çalışma kapsamında, seçilen halat karelağının önemi, etkileri ve getirdiği ekonomik sonuçlar araştırılmıştır. Yapılan iterasyonlar neticesinde 3 farklı adette ve karelağda çelik halat kullanımının ve seçilen halat sayısına uygun adette kullanılan çelik demetlerin kesit güvenliğini sağlanması amaçlanmıştır. Yapılan analizler neticesinde, kesit güvenliği sağlanırken azaltılan halat sayısının ve buna karşın gereken daha fazla sayıda çelik demet kullanımının etkili olduğu durum tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında, tüm analizlerde şartnamenin sunmuş olduğu geçici durum ve servis durumu kesit gerilme limitlerine uyulmuştur. Kesit güvenliği açısından tüm iterasyonlar uygundur ancak Analiz 3’de kullanılan çelik halat metrajı ($55,39 \text{ kg/m}^3$) diğer analizlere kıyasla daha makul ve daha efektif olarak hesaplanmıştır.

Analizi 3’ün daha efektif olmasının 2 ana sebebi tespit edilmiştir. Birincisi, halat yörüngesinin köprü boy kesiti boyunca daha etkin bir yörünge çizmesidir. Halatların ağırlık merkezleri, çekme tesirlerinin oluşacağı kesit yüzeylerine yakınlaştırıldıkça, elde edilen ön germe kuvveti daha efektif olacaktır ve kesiti daha etkin bir ön basınca yönlendirecektir. Raporun önceki bölümlerinde sunulan Şekil 8’de de görüleceği gibi Analiz 1’de açıklık ortasından alınan halat kesitinde, halat ağırlık merkezlerinin kesit alt yüzüne olan mesafesi 40 cm iken, Analiz 3’te halat merkezleri kesit yüzeyine 30 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Analiz 3’ü daha makul bir çözüm olarak gösteren ikinci ana sebep ise ön germe kayıplarının daha makul seviyelerde oluşudur. Kullanılan halat sayısı arttıkça, elde edilen ön germe kayıp miktarı artmaktadır ve ön germe etkisi de aynı oranda azalmaktadır. Analiz 3’te kullanılan ön germe halatlarının daha az sayıda oluşu, ön germe kalitesini artırmaktadır.

Bu çalışma, betonarme ard-germeli köprü teknolojisinin, köprü üstyapılarında uygulandığını kısaca özetlemiştir. Sonlu elemanlar yazılımları ile hazırlanmış olan analiz modelleri ile tasarımı etkileyen en ciddi konulardan biri olan çelik halat seçimleri konusu irdelenmiştir. Tasarımcı için farklı oranlardaki çelik halat kullanım kombinasyonları ile güvenli tasarım sunmak mümkündür ancak “en iyi” tasarıma ulaşmak ciddi bir optimizasyon ve yeterli sayıda iterasyon çalışması gereklidir. Çalışmanın ana teması özetleyen “en iyi” ürün arayışı, tasarımcıyı en güvenli ürüne en ekonomik seçimlerle ulaştırmaya yöneliktir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- A. Ghallab, 2013, “Calculating ultimate tendon stress in externally prestressed continuous concrete beams using simplified formulas” *Engineering Structures*, 46, 417-430.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design. Washington, DC.
- G. Ranzi and A. Ostinelli, 2017, “Ultimate behaviour and design of post-tensioned composite slabs” *Engineering Structures*, 150, 711-718.
- J. D. Chaitanya Kumar and L. Venkat, 2013, “Genetic algorithm based optimum design of prestressed concrete beam” *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3, 644-654.
- M. A. Pisani, 2018, “Behaviour under long-term loading of externally prestressed concrete beams” *Engineering Structures*, 160, 24-33.
- M. A. Utrilla and A. Samartin, 1991, “Optimized design of the prestress in continuous bridge decks” *Computers and Structures*, 1, 719-728.
- M. S. Kim, and Y. H. Lee, 2016, “Flexural behavior of posttensioned flat plates depending on tendon layout” *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 11.
- O. F. Hussien, T. H. K. Elafandy, A. A. Abdelrahman, S. A. Abdel Baky, and E. A. Nasr, 2012, “Behavior of bonded and unbonded prestressed normal and high strength concrete beams” *HBRC Journal*, vol. 8, 239-251.
- P. Fanning, 2001, “Nonlinear models of reinforced and posttensioned concrete beams” *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2, 111-119.
- W. Marks, W. Trochymiak 1991, “The selection of a system of prestressing tendons in hyperstatic beams as a problem of linear integer programming” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 3, 59-67.



KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞLARI ARASI AODV TABANLI YÖNLENDİRME ALGORİTMASININ BAŞARIM ANALİZİ

Seda SAVAŞCI ŞEN^{1*}, Murtaza CİCİOĞLU², Ali ÇALHAN³

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

²Bilişim Teknolojileri Bölümü, Milli Eğitim Bakanlığı, Bolu, Türkiye

³Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kablosuz Vücut Alan Ağları, AODV Algoritması, IEEE 802.15.6, Yönlendirme.

Öz

Vücut ısı, kalp ritmi ve solunum oranı gibi hayati veriler insan sağlığının değerlendirilmesi ve olası problemlerde anında müdahale edilebilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu yaşamsal ve fiziksel verilerin izlenmesinde ve değerlendirmesinde çeşitli sistemler kullanılabilir. Uzaktan sağlık izleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan Kablosuz Vücut Alan Ağları (KVAA) başta sağlık olmak üzere sportif, askeri ve etkileşimli oyunlar gibi birçok alanda uygulamalara konu olmuştur. Özellikle daha yoğun ortamlarda KVAA donanımlarını taşıyan bireylerin koordinatör düğümlerinin birbiri ile haberleşebilmesi (KVAA-arası) yönlendirme işlemlerinin önemini ortaya koymuştur. Bu çalışmada Riverbed Modeller benzetim yazılımında KVAA haberleşme ağı modellenmiştir. KVAA'lar arası haberleşmede verilerin hedeflerine başarılı bir şekilde ulaşmaları amacıyla AODV yönlendirme protokolü kullanılmıştır. KVAA-içi haberleşmede ise IEEE 802.15.6 protokolü kullanılmış ve tasarlanan sistemin başarımları için uçtan-uçta gecikme, enerji tüketimi ve iş çıkarma oranı gibi ağ başarımları parametreleri incelenmiştir.

PERFORMANCE ANALYSIS OF AODV BASED ROUTING ALGORITHM INTER WIRELESS BODY AREA NETWORKS

Keywords

Wireless Body Area Networks, AODV Algorithm, IEEE 802.15.6, Routing Algorithm.

Abstract

Vital data such as body temperature, heart rhythm and respiration rate are very important in evaluating human health and intervening immediately in possible problems. Various systems can be used to monitor and evaluate these vital and physical data. Wireless Body Area Networks (WBANs), which are widely used in remote health monitoring systems, have been the subject of applications in many areas such as sports, military and interactive games, particularly health. Especially in more intense environments, the coordinator nodes of individuals carrying WBAN equipment can communicate with each other (inter-WBAN), revealing the importance of routing processes. In this study, WBAN communication network was modeled in Riverbed Modeller simulation software. AODV routing protocol has been used in order to reach the targets of data successfully in inter-WBAN communication. The IEEE 802.15.6 protocol was used for intra-WBAN communication and the end-to-end delay, energy consumption and throughput parameters were analyzed for the performance analysis of the proposed system.

Alıntı / Cite

Savaşçı Şen, S., Cicioğlu, M., Çalhan, A., (2020). Kablosuz Vücut Alan Ağları Arası AODV Tabanlı Yönlendirme Algoritmasının Başarımları Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1138-1149.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Savaşçı Şen, 0000-0001-8569-6454
M. Cicioğlu, 0000-0002-5657-7402
A. Çalhan, 0000-0002-5798-3103

Makale Süreci / Article Process

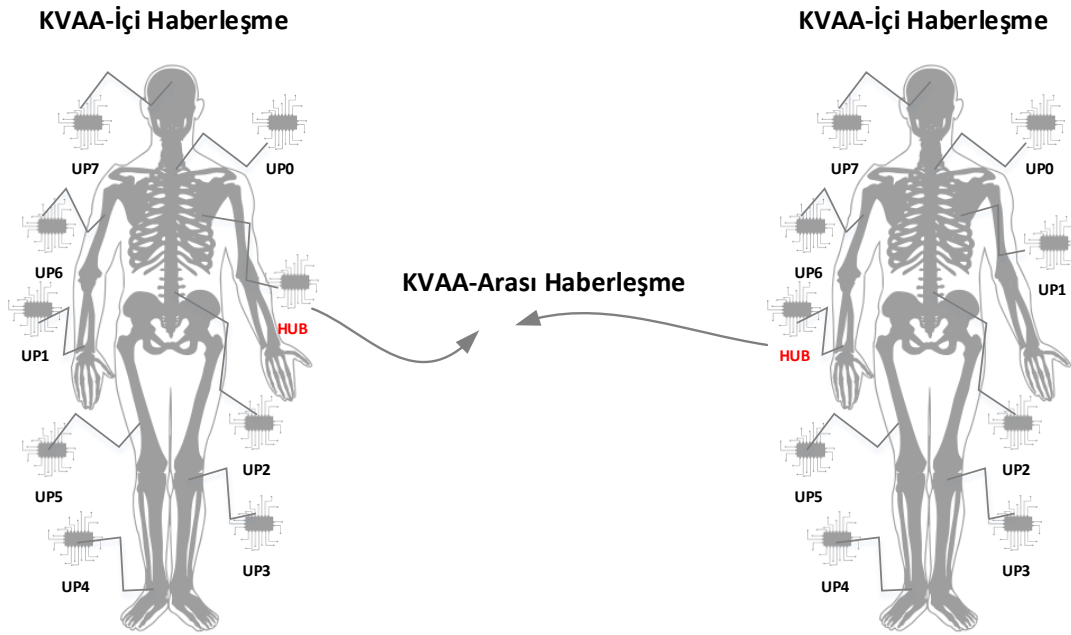
Başvuru Tarihi / Submission Date	20.04.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	20.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.11.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: sedasavascisen@duzce.edu.tr, +90-546-822-62-00

1. Giriş (Introduction)

Ülkemizde günümüz sağlık hizmetlerinin yeterli düzeyde olmasına rağmen sürekli gözetim altında tutulmak zorunda kalan hastaların, engellilerin ve yaşlıların giderek artan sağlık giderleri ve hastane yatak doluluk oranları bu bireylerin evlerinde ya da çalıştıkları, buldukları alanlarda da gözetim altında tutulabilme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Kablosuz haberleşme ve algılayıcı düğüm teknolojilerindeki gelişmeler ise toplumdaki temel bazı ihtiyaçlara oldukça verimli çözümler önermektedir (Bingöl vd., 2018; Gökcan ve Kahraman, 2019; Tanrıöven ve Taşdelen 2020). Literatürde yapılan çalışmalar uzaktan sağlık izleme sistemlerinin bu ihtiyaçları karşılamak için geliştirilebileceği yönündedir (Bouazizi vd., 2017). İnsan vücudunun üzerine ya da çevresine yerleştirilebilecek algılayıcı düğümler sayesinde yaşamsal ve çevresel veriler toplanabilmektedir (Liu vd., 2019). Bu bilgiler vücut sıcaklığı, solunum oranı, nabız, konum, vb. şeklinde sıralanabilmektedir. KVAA içinde verileri toplayan algılayıcı düğümler topladıkları verileri bir koordinatör düğüme aktarmaktadır. Koordinatör düğüm üzerinde toplanan veriler uzak noktalara iletilmektedir. Nihayetinde çeşitli kablosuz haberleşme teknolojileri aracılığıyla ilgili doktor ya da sağlık birimlerinde bu veriler görüntülenebilmektedir.

İnsan vücudundaki algılayıcı ve koordinatör düğümlerin oluşturduğu kablosuz ortam KVAA-içi haberleşme ile sağlanmaktadır. Farklı KVAA'ların koordinatör düğümleri üzerinden birbirleri ile iletişime geçmeleri KVAA-arası haberleşme ismini almaktadır (Park 2019). Şekil 1'de KVAA-içi ve KVAA-arası haberleşme resmedilmiştir.



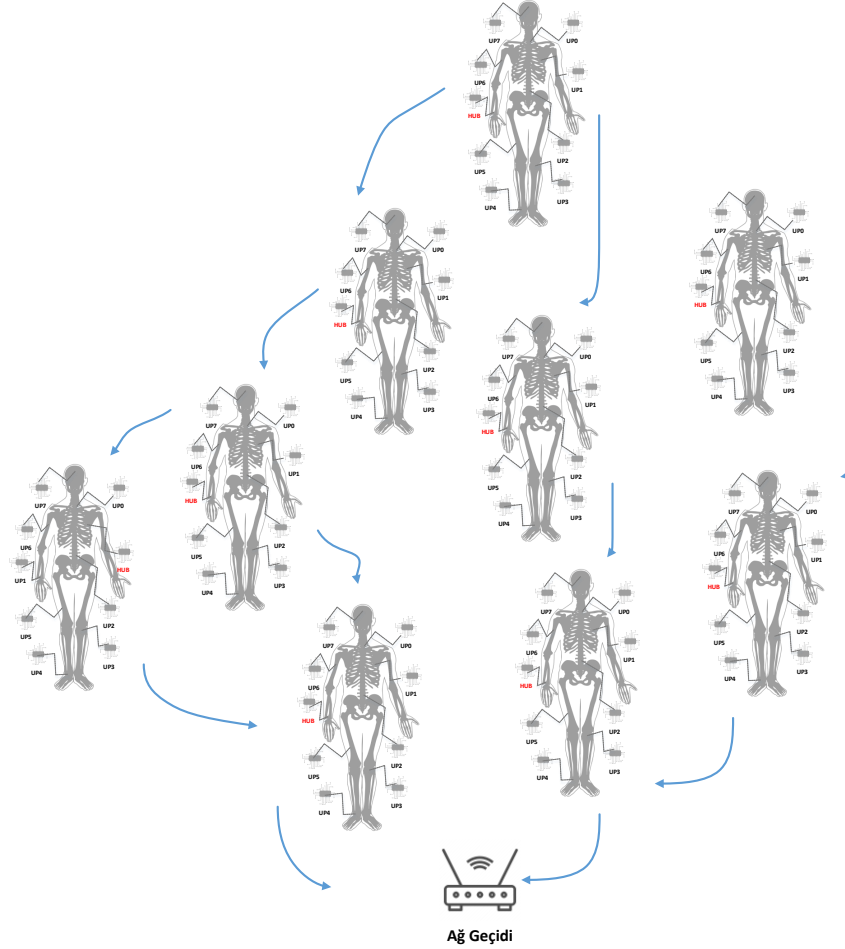
Şekil 1. KVAA-içi ve KVAA-arası haberleşme (Intra-WBAN and inter-WBAN communications)

KVAA'yı oluşturan algılayıcı düğümlerin ölçtüğü veriler birbirlerine göre farklı önem derecelerine ayrılmaktadır (Cicioğlu ve Çalhan 2019a). Öncelik sınıfı olarak adlandırılan bu önem dereceleri düşük öncelikten yüksek önceliğe doğru UP0'dan UP7'ye (user priority) sekiz sınıfa ayrılmaktadır (Jacob vd., 2017). Tablo 1'de öncelik sınıfları ve ilgili veriler sunulmuştur.

Tablo 1. KVAA kullanıcı öncelik sınıfları ve veri tipleri (V: Veri - Y: Yönetim) (WBAN user priority classes and data types (V: Data - Y: Management))

UP	Veri Tipi	Paket Tipi
0	Arka plan	V
1	En iyi Erişim	V
2	Mükemmel Erişim	V
3	Video	V
4	Ses	V
5	Medikal veri	V/Y
6	Yüksek Öncelikli Medikal Veri	V/Y
7	Acil	V

Öncelik sınıflarına göre koordinatör düğümler topladıkları verileri hedeflerine en az gecikme ile göndermeyi amaçlamaktadır. KVAA-içi haberleşme olarak adlandırılan bu haberleşmede koordinatör düğüm doğrudan ağ geçidine verileri gönderebilmelidir. Kapsama alanı dışında bulunan koordinatör düğümler uzak noktalara verileri gönderebilmek için KVAA-arası haberleşmeyi kullanması gerekmektedir. Bu sebeple koordinatör düğümler birbirleri üzerinden verileri gönderme yeteneğine sahip olmalıdır. Bu işlem kablolu ve kablosuz ağ sistemlerindeki yönlendirme protokolleri sayesinde gerçekleştirilebilmektedir (Jahir vd., 2019). Şekil 2'de KVAA-arası yönlendirme işlemi resmedilmiştir.



Şekil 2. Örnek KVAA-arası yönlendirme işleminde olası rotalar (Possible routes in example inter-WBAN routing process)

Yönlendirme işlemi ara düğümlerin seçimi için bir dizi işlemden oluşmaktadır. Ara düğüm seçimi SNR, RSSI, atlama sayısı gibi belirli parametrelere bakılarak karar verilmektedir (Cicioğlu ve Çalhan, 2019b; Luo vd., 2019). Bu parametrelerin değerlendirilmesi için koordinatör düğümlerin birbirlerine ya gerektiğinde ya da belirli zaman aralıklarında ilgili parametreleri göndermeleri gerekmektedir (Cicioğlu ve Çalhan 2019c). KVAA'lar Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA)'ın bir çeşididir. Literatürde birçok KAA yönlendirme algoritması mevcuttur. KAA için tasarlanan yönlendirme algoritmalarının doğrudan KVAA'lara uygulanamamasının birçok nedeni vardır. Özellikle KVAA yapısının değişken ve heterojen olması, veri oranı olarak KAA'daki 250 kbps'dan çok daha fazlasına ihtiyaç olması, öncelik sınıflarının olması ve hayati verilerin taşınmasından dolayı veri kaybının ve gecikmenin en az olması gibi çeşitli nedenler sıralanabilir (Qu vd., 2019).

Literatürde KVAA-içi ve KVAA-arası yönlendirme şeklinde bir sınıflandırma yapılmamıştır. Aslında KVAA-içi ve KVAA-arası yönlendirme protokolleri geliştirilmiş olup genellikle KVAA-içi yönlendirme amaçlanmıştır. Bu protokoller altı ana başlık halinde; servis kalitesini dikkate alan yönlendirme, küme tabanlı yönlendirme, sıcaklık tabanlı yönlendirme, duruş tabanlı yönlendirme, atlama sayısını dikkate alan yönlendirme ve katmanlar arası yönlendirme olarak sıralanabilmektedir (Qu vd., 2019; Yessad vd., 2018).

KVAA'lardaki hayati öneme sahip farklı veri türleri beraberinde servis kalite gereksinimlerinde de farklılıklara sebep olmaktadır. Servis kalitesini dikkate alan yönlendirme, KVAA uygulamasına bağlı olarak uçtan uca gecikme, enerji tüketimi, güvenilirlik gibi farklı servis kalitesi gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır. Küme yönlendirme protokolü ağdaki düğümleri düğüm kümelerine bölmektedir. Her küme birkaç küme düğümü ve bir küme

başından oluşmaktadır. Küme başı algoritma tarafından seçilir ve doğrudan iletişim yükünü azaltmak için kümedeki verileri bir araya getirmekten ve hedefe iletmekten sorumludur. Sıcaklık tabanlı yönlendirmede, girişimleri en aza indirmek ve biyomedikal algılayıcı düğümlerinin implantasyon sürecinden kaynaklanabilecek doku ısınmasını önlemek için, tasarımcılar insan dokularını aşırı ısınmadan koruyan çözümler geliştirilmiştir. Duruş tabanlı yönlendirme, hızlı ve kararlı bir yol oluşturmak için çeşitli dinamik duruşlarda insan vücudunun ağ topolojisini analiz etmek için kullanılmaktadır.

IEEE 802.15.6 standardına göre, KVAA'larda bir atlama veya iki atlama iletişiminde izin verilmektedir. Çalışmamızda KVAA-içi haberleşme için IEEE 802.15.6 standardı Riverbed Modeller benzetim yazılımında modellenmiştir. Ayrıca çalışmamızda KVAA-arası haberleşmede yönlendirme işlemi için yeni bir sıra numarasına veya en düşük atlama sayısına bağlı olarak rota seçen AODV yönlendirme algoritması tercih edilmiştir. Benzetim modelinde her bir koordinatör düğüm kendisine özgü bir yönlendirme tablosuna sahiptir. Bu tablo, AODV yönlendirme algoritması tarafından belirlenen en uygun yolu, bu yoldaki bir sonraki ve bir önceki koordinatör düğüm adres bilgilerini içerir. Bu tablolar yardımıyla yönlendirme gerçekleştirilir. Bir sonraki bölümde AODV yönlendirme algoritması ile Riverbed Modeller yazılımında hazırlanmış KVAA-arası haberleşme ağ benzetimi anlatılmaktadır.

Literatürde çalışmamızla alakalı birkaç çalışma geçmişte yapılmıştır. (Ben Arbia vd., 2015) çalışmalarında afet durumlarında çeşitli kablosuz ağ teknolojilerinin başarımlarını incelemişlerdir. IEEE 802.15.6 ve AODV yönlendirme protokolünün de içinde bulunduğu çalışmanın WSNet isimli ve en son 2009 yılında güncellenen bir benzetim programında yapıldığı iddia edilmektedir. Çalışmada IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 ve IEEE 802.15.6 standartlarının başarımlarını analizleri yapılmıştır. Protokoller ve benzetim ortamı hakkında detaylı bilgi verilmemekle birlikte sağlık alanındaki veri bilgilerine ve öncelik sınıflarına değinilmemiştir. (He vd., 2015) çalışmalarında, AODV ve DSDV yönlendirme protokolleri KVAA-içi haberleşmesi için incelenmiştir. Çalışmada gecikme, iş çıkarma oranı ve paket kaybı parametrelerine bakılmış ancak KVAA-arası haberleşmede yönlendirmenin nasıl olacağı açıklanmamıştır. Ayrıca IEEE 802.15.6 standardından da söz edilmemiştir. (Abdullah vd., 2019) çalışmalarında uzaktan sağlık görüntüleme işlemi için KVAA'da kümeleme yaklaşımı ile AODV protokolü kullanılmıştır. Başarımların analizi için birçok parametre incelenmiş fakat diğer benzer çalışmalarda olduğu gibi ISO/IEEE 11073 servis kalitesi gereksinimleri dikkate alınmamıştır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında çalışmamızın farklarını şu şekilde sıralayabiliriz:

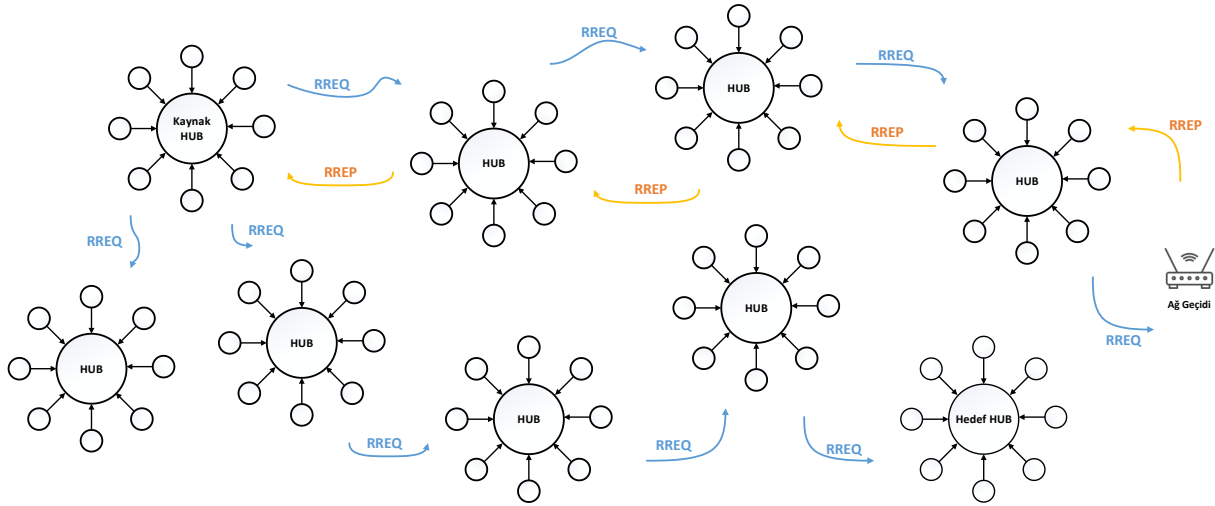
- KVAA-içi haberleşme için IEEE 802.15.6 standardı modellenmiştir.
- KVAA-arası haberleşme için AODV yönlendirme protokolü kullanılmıştır.
- ISO/IEEE 11073 servis kalitesi gereksinimleri göz önünde bulundurulmuştur.
- Tüm modellerde Riverbed Modeller benzetim yazılımında gerçekleştirilmiştir.
- Farklı KVAA sayıları için servis kalitesi parametreleri incelenmiştir.

2. Geliştirilen Sistem Modeli (Developed System Model)

Benzetim programlarından faydalanmak haberleşme ağlarının tasarlanması için vazgeçilmez bir yöntemdir. Riverbed Modeller, yeni nesil haberleşme ağlarının modellenmesini ve başarımlarının gerçekleştirilmesini sağlayan bir ağ benzetim programıdır ("Riverbed Modeller Software" 2020). Kablolu ve kablosuz ağ teknolojilerinin TCP/IP katmanları modellenmektedir. Çalışmamızda KVAA ağı IEEE 802.15.6 standardını destekleyecek şekilde modellenmiş ve KVAA-içi haberleşme için kullanılmıştır. IEEE 802.15.6 standardı hakkında detaylı bilgilere referans kitabından (IEEE Computer Society ve IEEE Standards Association 2012) ulaşılabilir. Her bir KVAA ağı sekiz öncelik sınıfından birine sahip sekiz kablosuz vücut algılayıcı düğümünden ve bir koordinatör düğümünden (literatürde HUB şeklinde de isimlendirilir) oluşmaktadır. Çalışmamızda her algılayıcı düğüm algıladığı verileri bağlı olduğu HUB düğümüne göndermektedir. HUB düğümleri topladığı bu verileri ağ geçidine göndermektedir. Gönderilen veriler böylece uzaktaki doktor ya da sağlık birimleri tarafından görüntülenebilmektedir. Kapalı ortamlarda ya da ağ geçidinin tek olduğu durumlarda her KVAA grubu (1 adet HUB ve HUB'a bağlı çeşitli sayıda algılayıcı düğüm) ağ geçidi kapsamına alanına olamamaktadır. Bu durumda HUB'lar birbiri üzerinden verileri ağ geçidine göndermek durumundadır. Bu amaçla KVAA-arası haberleşme AODV yönlendirme algoritması sayesinde gerçekleştirilmektedir.

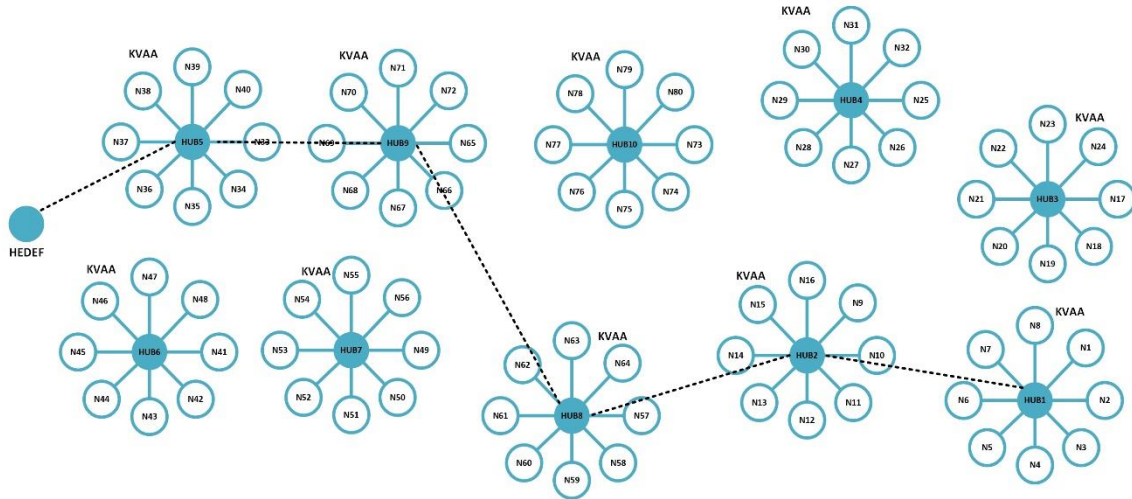
AODV bir ağın oluşabilmesi için düğümler arasında kendi kendine başlayabilen, reaktif, dinamik ve çok atlamalı yönlendirme sağlamaktadır (Perkins ve Royer 1999). AODV döngüsüz (loop-free) ve ağ topolojisinin değişimlerinde Bellman-Ford 'un sonsuza kadar sayma (counting to infinity) probleminden uzaklaştıran bir yaklaşımdır (Loo vd., 2016). Yönlendirme işlemi ayrıca yolun geçersiz olduğu durumları düğümlere bildirebilmektedir.

AODV'nin bir özelliği de, her bir rota için hedef sıra numarası (sequence number) kullanmasıdır. Hedef sıra numarası, eklenecek hedef adres bilgisi ile birlikte talep eden düğümlere gönderilen tüm rota bilgilerinden oluşturulmaktadır. Hedef sıra numaralarını kullanmak döngüye girmemeyi garanti etmekte ve yönlendirme protokolünün tasarlanmasını kolaylaştırmaktadır. Rota isteğinde bulunan bir düğüm; iki rota arasındaki seçim göz önüne alındığında, en büyük sıra numarasına sahip olanı seçmektedir.



Şekil 3. AODV RREQ ve RREP paketleri ile rota bulma (Discovering route with AODV RREQ and RREP packets)

Şekil 3'te kaynak KVAA'da bulunan HUB tarafından başlatılan rota isteği ve sonrasında KVAA-arası paket alışverişini gösterilmektedir. RREQ paketi iletme başlamak isteyen HUB tarafından oluşturularak komşu KVAA HUB'larına gönderilmektedir. Böylece her HUB komşusuna RREQ paketini iletmektedir. Bu algorithmada RREQ paketini alan her bir HUB tekrar aynı RREQ paketini almasın diye sıra numarasını kullanmaktadır. Ağ boyunca ilerleyen RREQ paketleri hedef noktaya ulaşınca, bir sonraki aşamaya geçilmektedir. RREQ paketini alan hedef buna karşılık RREQ ile elde edilen rota bilgilerini kullanarak karar verilen rota üzerinden ters yönde RREP paketini göndermektedir.



Şekil 4. Riverbed Modeler benzetim ortamı (Riverbed Modeler simulation environment)

Diğer bir anlatışla; bir kaynaktan bilinmeyen bir hedefe iletilecek veriler olduğunda, o hedef için bir RREQ yayınlanmaktadır. Her ara düğümde, bir RREQ paketi alındığında kaynağın temel alındığı bir rota oluşturulmaktadır. Alıcı düğüm daha önce bu RREQ paketini almadıysa, hedef değilse ve hedefe giden geçerli bir rotası yoksa RREQ paketini yeniden yayınlamaktadır. Alıcı düğüm hedefse veya hedefe giden geçerli bir rotaya sahipse RREP paketini oluşturmaktadır. RREP paketi yayıldıkça, her ara düğüm hedefe bir yol oluşturmaktadır. Kaynak düğüm RREP paketini aldığı anda, hedefe giden yolu kaydeder ve veriyi göndermeye başlar. Eğer kaynak düğüm tarafından birden fazla RREP paketi alınmışsa en kısa atlama sayısına sahip rota seçilmektedir. Bu işlemler Şekil 3'te ayrıntılı şekilde gösterilmiştir. Şekil 4'te ise tasarlanan benzetim ortamı verilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Tasarlanan sistemin başarımlı analizini yapmak için farklı sayılarda KVAA'lerden oluşan 3 senaryo hazırlanmıştır. Her senaryoda uçtan uca gecikme, iş çıkarma oranı ve enerji tüketimi parametreleri incelenmiştir. Tablo 2'de benzetim parametreleri yer almaktadır.

Tablo 2. Benzetim parametreleri (Simulation parameters)

Parametreler	Değerler	
Benzetim süresi	300 sn	
Frekans	2400 - 2483.5 GHz	
Algılayıcı düğüm ve HUB sayısı	10 HUB+ 80 düğüm (1. senaryo) 6 HUB+ 40 düğüm (2. senaryo) 20 HUB+ 16 düğüm (3. senaryo)	
Bant genişliği	1 MHz	
Veri hızı	971.4 kbps	
Paket boyutu	100 bayt	
Paket gelişler-arası süresi	UP7 = 0.25 sn.	UP3 = 3 sn.
	UP6 = 0.5 sn.	UP2 = 4 sn.
	UP5 = 1 sn.	UP1 = 5 sn.
	UP4 = 2 sn.	UP0 = 6 sn.
Enerji Tüketim Parametreleri (MicaZ değerleri)		
Pil	2 AA (3 V)	
Başlangıç enerji değeri	34600 Joule	
Paket iletim durumu	0 dBm = 17.4 mA	
Paket alım durumu	27.7 mA	
Boşta durumu	35 μ A	
Uyku durumu	16 μ A	

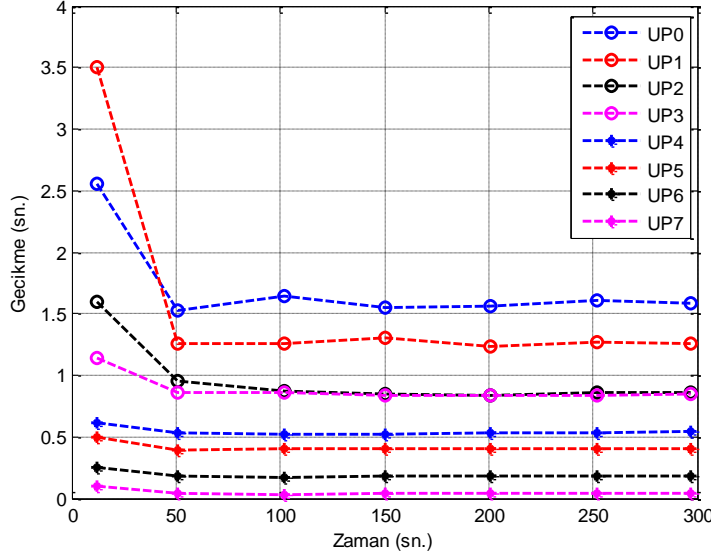
3.1. Senaryo 1 (Scenario 1)

Tasarlanan Senaryo 1'deki sistemin başarımlı analizi için Tablo 2'de verilen benzetim parametreleri kullanılarak Şekil 4'te gösterilen topoloji oluşturulmuştur. Senaryo 1'de 10 KVAA bulunmakta her KVAA'da 1 HUB ve her bir HUB'a bağlı 8 algılayıcı düğüm bulunmaktadır. Bu senaryonun benzetim sonucunda Şekil 5'te verilen gecikme sonuçları ve Şekil 6'da verilen iş çıkarma oranı sonuçları elde edilmiştir. Senaryolarda her bir düğüm bir öncelik sınıfına sahiptir (Örneğin N1, UP0 öncelik sınıfına sahiptir).

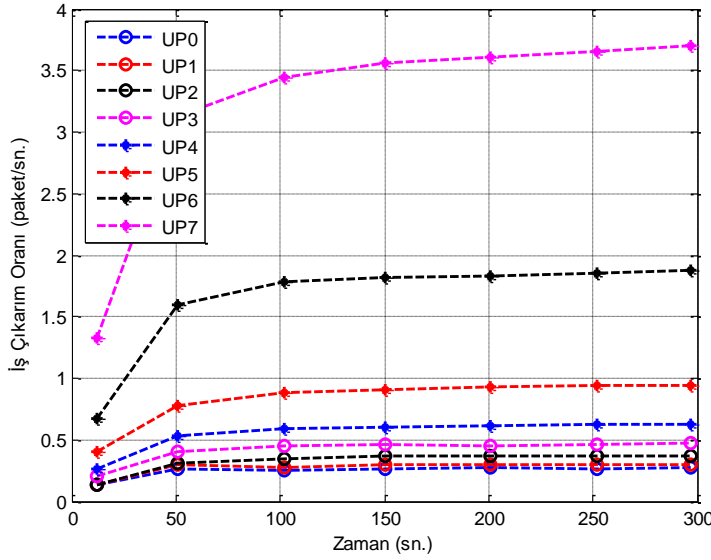
Şekil 5'te farklı önceliklere sahip algılayıcı düğümlerin gecikme sonuçları verilmiştir. Bu senaryoda hedefin kapsama alanı dışında bulunan HUB1 düğümü kendisine bağlı 8 farklı önceliğe sahip algılayıcı düğümden aldığı paketleri AODV yönlendirme algoritması yardımıyla hedefe iletmektedir. IEEE 802.15.6 standardında öncelikler en yüksek öncelik olan UP7'den UP0'a doğru kategorize edilmektedir. Her bir önceliğe farklı çekişme pencereleri tanımlanmıştır. Şekil 5'te de görüldüğü üzere en yüksek önceliğe sahip UP7 paketleri hedefe daha az gecikmeye giderken, en düşük önceliğe sahip UP0 paketleri hedefe daha geç ulaşmıştır. Bunun temel nedeni algılayıcı düğümler arasındaki çekişme pencere aralıklarındaki farklılıklardır. Bu yaklaşım KVAA'larda hayati önem taşıyan paketlerin hedefe en az gecikmeyle ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca kapsama alanı dışında kalan HUB1 ve kendisine bağlı algılayıcı düğümler AODV yönlendirme algoritması yardımıyla HUB2, HUB8, HUB9, HUB5 ara düğümleri üzerinden paketlerini hedefe ulaştırabilmiştir.

Şekil 6'da farklı önceliklere sahip algılayıcı düğümlerin iş çıkarma oranları verilmiştir. Burada yine farklı öncelikler arasında iş çıkarma oranlarının değişimi gözlemlenmiştir. Senaryomuzun benzetim parametrelerinin verildiği Tablo 2'de farklı önceliklere sahip algılayıcı düğümlerin paket gelişler arası süreleri verilmiştir. KVAA mimarisinin benzetim senaryolarında gerçekçi sonuçlar alabilmek amacıyla heterojen bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu amaçla en yüksek önceliğe sahip UP7 paketlerinin paket üretim sıklıkları daha yüksek tutulmuştur. EKG yüksek veri miktarı göndermesi gerekirken, kişinin nabız, sıcaklık veya pozisyon gibi durum verilerinin daha düşük veri miktarıyla iletilebildiği bilinmektedir. Bu bağlamda her bir algılayıcı düğüm için üstel dağılım fonksiyonu kullanılarak farklı paket üretim sıklıkları tanımlanmıştır (UP7=0.25 sn., UP6=0.5 sn., UP5=1 sn., UP4=2 sn., UP3=3 sn., UP2=4 sn., UP1=5 sn., UP0=6 sn.). Şekil 6'da görüldüğü üzere paket üretim sıklıklarına göre iş çıkarma oranları

arasında değişimler gözlemlenmiştir. Her bir algılayıcı düğümün paketlerini HUB2, HUB8, HUB9, HUB5 ara düğümleri üzerinden AODV yönlendirme algoritması yardımıyla başarılı bir şekilde hedefe ulaştırdığı görülmektedir.



Şekil 5. Senaryo 1 için HUB1'e bağlı düğümlerin gecikme sonuçları (Delay results for nodes connected to HUB1 for Scenario 1)



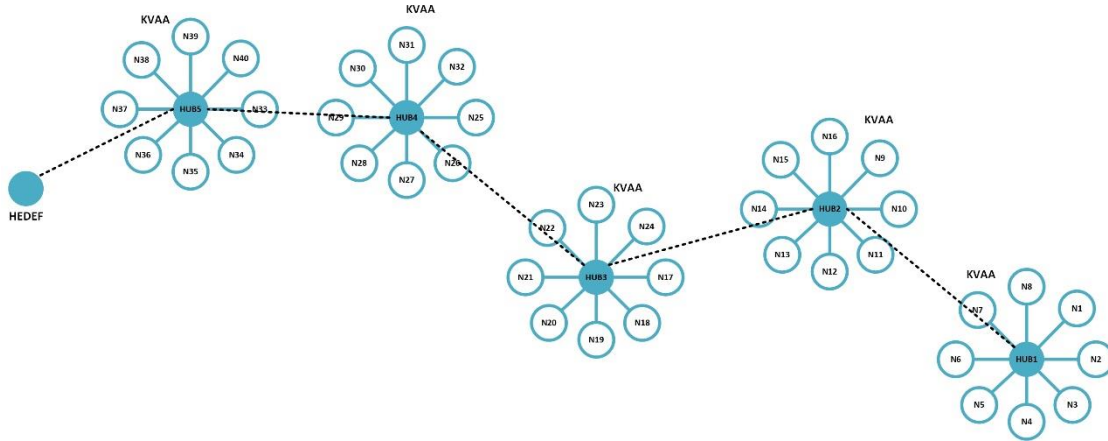
Şekil 6. Senaryo 1 için HUB1'e bağlı düğümlerin iş çıkarma sonuçları (Throughput results of nodes connected to HUB1 for Scenario 1)

3.2. Senaryo 2 (Scenario 2)

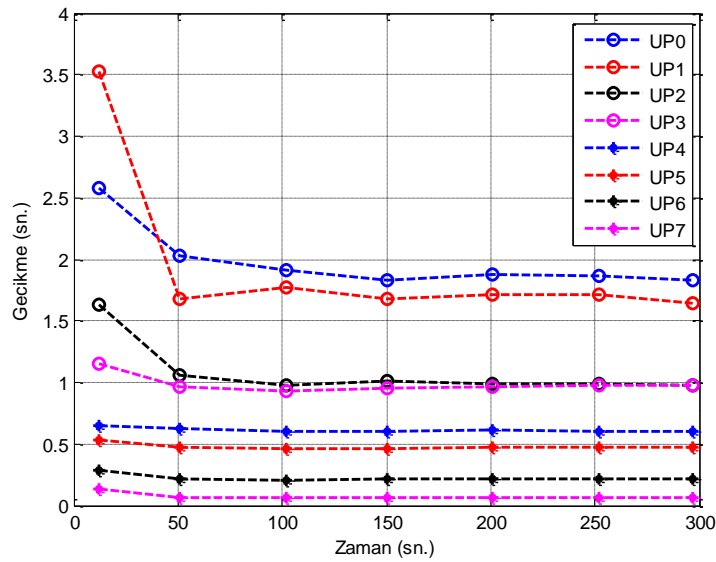
Bu senaryoda daha az yoğun bir ortamda KVAA düğümleri ile AODV yönlendirme algoritmasının performans analizleri incelenmiştir. Şekil 7'de gösterildiği gibi 5 adet KVAA düğüm grubundan oluşan bu senaryoda KVAA sayısı azaltılarak gecikme ve iş çıkarma oranları elde edilmiştir.

Şekil 8'de HUB1 düğümüne bağlı farklı önceliklere sahip algılayıcı düğümlerin gecikme sonuçları verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre yine öncelikler arasında gecikme farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Bunun temel nedeninin çekişme penceresi aralıkları olduğu bilinmektedir. Ancak ilk senaryomuzdaki gecikme sonuçları ile karşılaştırıldığında farklı öncelikler için gecikme değerlerinin bir miktar yükseldiği gözlemlenmiştir. Buradaki temel neden AODV yönlendirme algoritmasının çalışma prensibiyle ilgilidir. Senaryo 1'de olduğu gibi daha yoğun KVAA düğüm grubunun bulunduğu ortamlarda AODV yönlendirme algoritması en uygun rota bulma aşamasında farklı ve en uygun seçeneklere sahip olabilirken, senaryo 2'de olduğu gibi daha az yoğunlukta olan ortamlarda bu seçenekler azalmaktadır. Bu nedenle en uygun rota için farklı seçenekler bulunamamıştır. HUB1 kendisine bağlı algılayıcı düğümlerden aldığı paketleri HUB2, HUB3, HUB4, HUB5 ara düğümleri üzerinden AODV yönlendirme

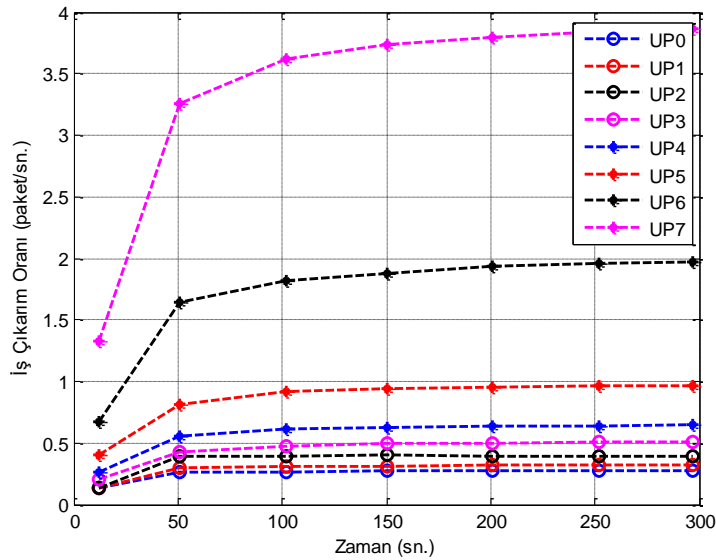
algoritması yardımıyla hedefe ulaştırmaktadır. Senaryoda da görüldüğü gibi elde edilen bu zorunlu rota gecikmenin bir miktar artmasına sebep olmuştur.



Şekil 7. Senaryo 2 için benzetim ortamı (Simulation environment for Scenario 2)



Şekil 8. Senaryo 2 için HUB1'e bağlı düğümlerin gecikme sonuçları (Delay results for nodes connected to HUB1 for Scenario 2)

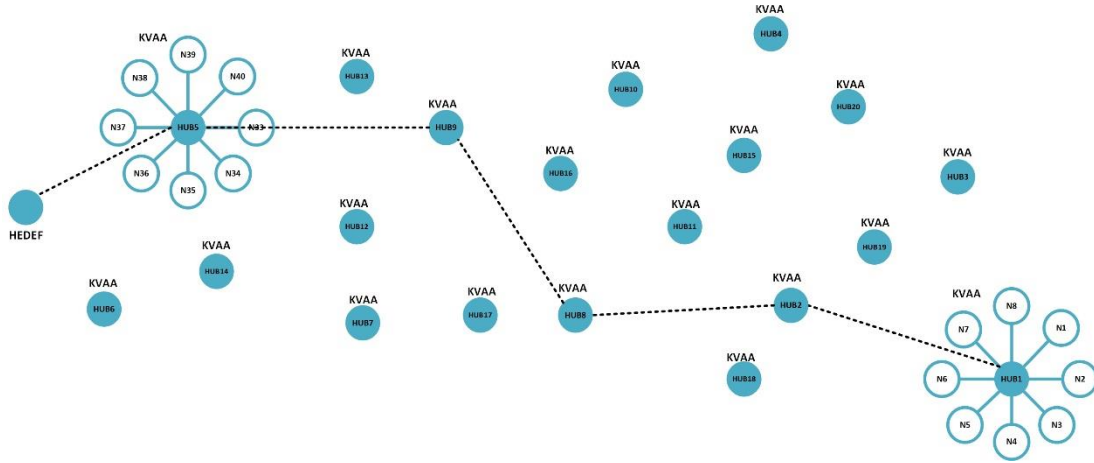


Şekil 9. Senaryo 2 için HUB1'e bağlı düğümlerin iş çıkarma sonuçları (Throughput results of nodes connected to HUB1 for Scenario 2)

KVAA sayısı azaltıldığı için Senaryo 1'e göre iş çıkarma oranı da arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek önceliğe sahip UP7'nin iş çıkarma oranı diğer düğümlere göre yüksektir. Şekil 9'da HUB1 düğümüne bağlı farklı öncelik ve paket üretim sıklıklarına sahip algılayıcı düğümlerin iş çıkarım oranı sonuçları verilmiştir. Görüldüğü üzere her bir algılayıcı düğümün sahip olduğu paket gelişler arası süreye göre paketlerini HUB2, HUB3, HUB4, HUB5, HUB6 ara düğümleri üzerinden AODV yönlendirme algoritması yardımıyla başarılı bir şekilde hedefe ulaştırdığı görülmektedir. Daha yoğun KVAA grubunun bulunduğu ilk senaryo ile karşılaştırıldığında farklı paket gelişler arası süreye sahip algılayıcı düğümlerin iş çıkarım oranlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir. Şekil 8'de gecikmenin ortamdaki KVAA grubunun yoğunluğuna göre ters orantılı olarak değişimi gözlemlenirken, iş çıkarım oranında bu durum doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. Buradaki temel sebep ise IEEE 802.15.6 standardında da ifade edildiği üzere belirli bir mesafe içinde KVAA düğüm grubunun artması ile daha fazla farklı öncelikli algılayıcı düğümlerin ortama erişmeye çalışmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle de iş çıkarım oranında öncelik seviyelerine göre düşüşler gerçekleşebilmektedir.

3.3. Senaryo 3 (Scenario 3)

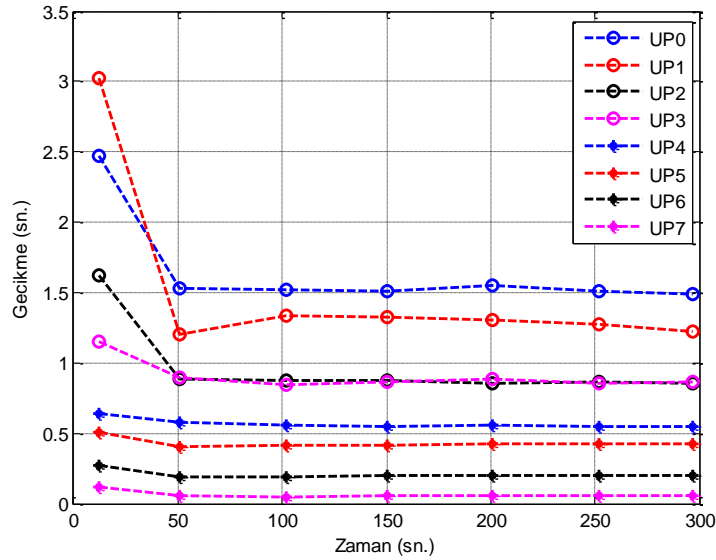
Son olarak üçüncü senaryoda ise Şekil 10'da da gösterildiği üzere ilk iki senaryodan farklı olarak daha fazla HUB düğümü ile kaynak ve hedef HUB düğümlerine bağlı farklı öncelikli sekiz algılayıcı düğüm oluşturulmuştur. Bu sayede AODV yönlendirme algoritmasının farklı öncelikli paketlere sahip HUB1 düğümünün hedefe paketlerini iletebilmesi için farklı rota seçenekleri içinden en az atlamaya sahip rotayı bulması sağlanmıştır.



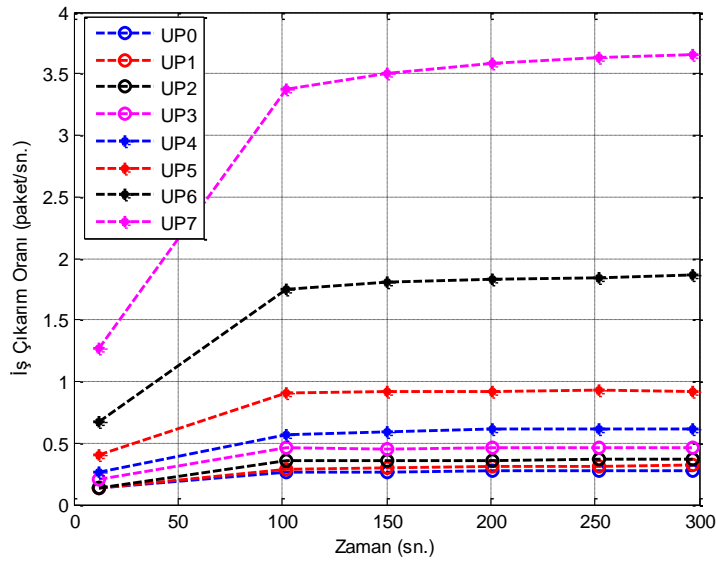
Şekil 10. Senaryo 3 için benzetim ortamı (Simulation environment for Scenario 3)

Şekil 11'de üçüncü senaryo için farklı öncelikli paketlere sahip algılayıcı düğümlerin gecikme sonuçları verilmiştir. Elde edilen bu gecikme sonuçları incelendiğinde diğer iki senaryoya göre bir miktar düşüşün olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi birden fazla olası rota içinden en uygun rota tercihinin AODV yönlendirme algoritması ile yapabilmesidir. Bu sayede daha az atlamaya sebep olacak rotaların belirlenmesi, ara düğümlerdeki yoğunlukların azalması beraberinde farklı öncelikli ve farklı paket üretim sıklığına sahip düğümlerin gecikmelerinde de iyileşme sağlamıştır. Bu sonuç hem IEEE 802.15.6 standardında öncelikli düğümlerin paketlerini hedefe daha hızlı göndermesi, hem de AODV yönlendirme algoritmasının daha yoğun düğüm ortamlarında verimli çalışması açısından oldukça önemlidir.

Şekil 12'de ise üçüncü senaryomuzdaki HUB1 kaynak düğümüne bağlı farklı paket gelişler arası süresine ve farklı önceliklere sahip algılayıcı düğümlerin iş çıkarım oranları verilmiştir. Diğer senaryolar ile kıyaslandığında KVAA sayısı artsa bile iş çıkarım oranlarının düşmediği gözlemlenmiştir. Buradaki temel sebep ara düğümlerdeki farklı öncelikli algılayıcı düğümlerin kaldırılması ve AODV yönlendirme algoritmasının en uygun rotayı bulması sayesinde gerçekleşmiştir. IEEE 802.15.6 standardında belirli bir mesafe aralığında KVAA düğüm grubu sayısının artması paket kayıpları ve parazit problemlerine sebep olmaktadır. Bu bağlamda daha yoğun senaryolarda performans sürekli azalacaktır.

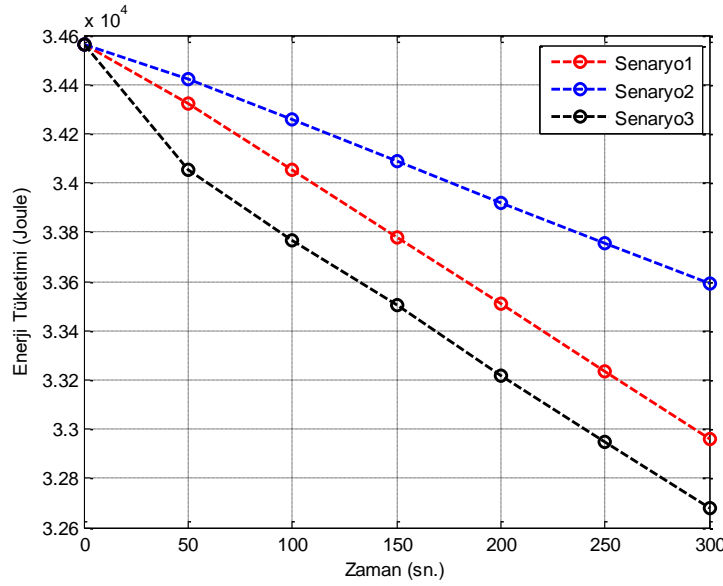


Şekil 11. Senaryo 3 için HUB1'e bağlı düğümlerin gecikme sonuçları (Delay results for nodes connected to HUB1 for Scenario 3)



Şekil 12. Senaryo 3 için HUB1'e bağlı düğümlerin iş çıkarma sonuçları (Throughput results of nodes connected to HUB1 for Scenario 3)

Çalışmamızda ayrıca üç senaryonun enerji tüketim sonuçları da karşılaştırılmıştır. Enerji tüketim sonuçları Tablo 2'de verilen MicaZ (Crossbow Technology 2008) parametreleri temel alınarak hesaplanmıştır. Enerji tüketim değerleri paket alma, paket gönderme, boşa ve uyku durumlarında, her bir duruma karşılık gelen tüketim değerleri üzerinden ele alınmış ve temel formüller Zigbee modelinden referans ("Zigbee Specification" 2015) alınmıştır. Şekil 13'te ortamdaki HUB düğümleri için enerji tüketim sonuçları verilmiştir. HUB düğümlerine bağlı farklı öncelikli algılayıcı düğümlerin enerji tüketim değerleri ele alınmamıştır. Benzetimin başında HUB düğümlerinin başlangıç enerji değeri 34560 joule olarak varsayılmıştır. Bu sebeple 300 sn.'lik benzetim süresi boyunca enerji azalmaktadır. En fazla enerji tüketimi ortamda 20 KVAA'nın bulunduğu Senaryo 3'te olmuştur. En az enerji tüketimi ise en az HUB düğümüne sahip Senaryo 2'de gerçekleşmektedir.



Şekil 13. Her Senaryo için HUB1'in enerji tüketim sonuçları (Energy consumption results of HUB1 for each Scenario)

Tablo 3'te tüm senaryoların gecikme, iş çıkarma ve enerji tüketim değerleri karşılaştırmalı olarak sayısal veriler üzerinden incelenmiştir. Üç senaryo için gecikme ve iş çıkarma sonuçları ortalama olarak hesaplanırken, enerji tüketim değerleri ise toplam olarak verilmiştir. İlk olarak gecikme sonuçları incelendiğinde, Senaryo 3'ün en az gecikmeye sahip olduğu görülürken, Senaryo 2'nin ise en fazla gecikmeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu gecikmeler arasındaki farklılıklar senaryolar arasındaki yoğunluk ile AODV yönlendirme algoritması ile elde edilen rota üzerindeki atlama sayısına göre değişim göstermiştir. Örneğin daha yoğun algılayıcı düğüme sahip olan Senaryo 3'te en düşük gecikme değerlerinin elde edilmesi, AODV yönlendirme algoritmasının alternatif rotalar içinde en uygun yolu bulmasıyla gerçekleşebilmiştir. Bir diğer taraftan daha az algılayıcı düğüm sayısına sahip Senaryo 2'de ise alternatif rota bulunamadığı için gecikmenin artmasına sebep olmuştur.

İş çıkarım oranında ise en fazla değer Senaryo 2'de, en düşük değer ise Senaryo 1'de görülmüştür. Tablo 2'de verildiği üzere algılayıcı düğümlerin paket gelişer arası süresi farklı önceliklere göre değişmektedir. Ayrıca paket üretiminde üstel dağılım fonksiyonu temel alınmıştır. Bu farklılıklar ve ortamdaki algılayıcı düğüm sayısı iş çıkarım oranını da etkilemiştir. Ayrıca her üç senaryoda da paketlerin neredeyse tamamı başarılı bir biçimde hedefe iletilmiştir. Son olarak enerji tüketim değerleri karşılaştırıldığında Senaryo 2'nin en az, Senaryo 3'ün ise en fazla enerji tüketim değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Senaryolarda kullanılan algılayıcı düğüm sayısındaki artış enerji tüketimini de doğal olarak arttırmaktadır. AODV yönlendirme algoritmasının rota keşif aşamasına dahil olan HUB sayısı enerji tüketim sonuçlarını da etkilemektedir. Alternatif rotalar için en uygun yolun bulunması daha az gecikme ve daha yüksek iş çıkarımı sağlarken, enerji tüketimini de arttırabilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile de tutarlık göstermektedir (Dhurandher vd., 2009; Misra ve Dias Thomasious 2010).

Tablo 3. Senaryolardan elde edilen sayısal sonuçlar (Numerical results from scenarios)

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Gecikme (sn)	0,06530466	0,07616425	0,04669754
İş Çıkarma (paket/sn)	3,17016184	3,34884309	3,20609622
Enerji Tüketimi (Joule)	1.597,964797	970,759133	1882,264654

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada KVAA-arası haberleşmede AODV yönlendirme algoritması kullanılarak farklı yoğunluk ve önceliklere sahip senaryolar için gecikme, iş çıkarım ve enerji tüketim parametreleri incelenmiştir. KVAA'lar için bir standart haline gelen IEEE 802.15.6 KVAA-içi haberleşmede, AODV yönlendirme algoritması ise KVAA-arası haberleşmede kullanılmış ve bu protokoller Riverbed Modeler benzetim yazılımında gerçekleştirilmiştir. KVAA'lar için oluşturulan üç senaryoda en yüksek yoğunluğa sahip Senaryo 3'ün en az gecikmeye ve en yüksek enerji tüketimine sahip olduğu, en az yoğunluğa sahip olan Senaryo 2'nin ise en yüksek gecikmeye ve en düşük enerji tüketimine sahip olduğu görülmüştür. AODV yönlendirme algoritmasının yoğun ağ senaryolarında alternatifler içinde en uygun rota bulma potansiyelinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede daha az gecikmeyle paketlerin hedefe ulaşması sağlanmıştır. Gelecek çalışmalar için açık alanda coğrafik tabanlı yönlendirme

algoritmasının Riverbed Modeller yazılımında programlanması ve AODV yönlendirme algoritması ile karşılaştırılması planlanmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdullah, W. A. N. W., Yaakob, N., Ahmad, R. B., Elobaid, M. E., & Yah, S. A. 2019. Impact of clustering in AODV routing protocol for wireless body area network in remote health monitoring system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(2), 689-695
- Ben Arbia, D., Alam, M. M., Attia, R., & Ben Hamida, E. 2015. Behavior of wireless body-to-body networks routing strategies for public protection and disaster relief 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 117-124.
- Bingöl, O., Özkaya, B., & Bayram, M. 2018. Wireless Sensor Network Based Remote Drip Irrigation System. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(4), 554-563.
- Bouazizi, A., Zaibi, G., Samet, M., & Kachouri, A. 2017. Wireless body area network for e-health applications. *International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C)*, 64-68.
- Cicioğlu, M., & Çalhan, A. 2019. HUBsFLOW: A novel interface protocol for SDN-enabled WBANs. *Computer Networks*, 160, 105-117.
- Cicioğlu, M., & Çalhan, A. 2019. SDN-based wireless body area network routing algorithm for healthcare architecture. *ETRI Journal*, 41(4), 452-464
- Cicioğlu, M., & Çalhan, A. 2019. Performance analysis of IEEE 802.15.6 for underground disaster cases. *Computer Standards & Interfaces*, 66, 103364.
- Crossbow Technology. 2008. MICAZ: Wireless Measurement System. Product Datasheet. http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz_datasheet.pdf.
- Dhurandher, S. K., Misra, S., Obaidat, M. S., Bansal, V., Singh, P. R., & Punia, V. 2009. EEAODR: An energy-efficient ad hoc on-demand routing protocol for mobile ad hoc networks. *International Journal of Communication Systems*, 22(7), 789-817.
- Gökcan, S. E., & Kahraman, N. 2019. Robotic Surface Material Recognition System Using Sensor Network. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 81-89.
- He, P., Li, X., Yan, L., Yang, S., & Zhang, B. 2015. Performance analysis of wban based on aodv and dsdv routing protocols. *2nd International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous HealthCare (Ubi-HealthTech)*, 1-4.
- IEEE Computer Society, & IEEE Standards Association. 2012. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks.
- Jacob, A. K., Kishore, G. M., & Jacob, L. 2017. Lifetime and latency analysis of IEEE 802.15.6 WBAN with interrupted sleep mechanism. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 865-878.
- Jahir, Y., Atiquzzaman, M., Refai, H., Paranjothi, A., & LoPresti, P. G. 2019. Routing protocols and architecture for Disaster Area Network: A survey. *Ad Hoc Networks*, 82(1), 1-14.
- Liu, H., Hu, F., Qu, S., Li, Z., & Li, D. 2019. Multipoint Wireless Information and Power Transfer to Maximize Sum-Throughput in WBAN with Energy Harvesting. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(4), 7069-7078.
- Loo, J., Mauri, J. L., Ortiz, J. H., & Maltz, D. A. 2016. Mobile Ad Hoc Networks: Current Status and Future Trends. *Computer*.
- Luo, X., Liu, L., Shu, J., & Al-Kali, M. 2019. Link Quality Estimation Method for Wireless Sensor Networks Based on Stacked Autoencoder. *IEEE Access*, 21572-21583.
- Misra, S., & Dias Thomasinuous, P. 2010. A simple, least-time, and energy-efficient routing protocol with one-level data aggregation for wireless sensor networks. *Journal of Systems and Software*, 852-860.
- Park, J. 2019. Bio-Inspired Approach for Inter-WBAN Coexistence. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(7), 7236-7240.
- Perkins, C. E., & Royer, E. M. 1999. Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 90-100.
- Qu, Y., Zheng, G., Ma, H., Wang, X., Ji, B., & Wu, H. 2019. A Survey of Routing Protocols in WBAN for Healthcare Applications. *Sensors*, 19(7), 1638.
- Riverbed Modeller Software. (2020). Riverbed Technology. <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeller.html>.
- Tanrıöven, M. H., & Taşdelen, K. 2020. Establishing a Mesh Network with Bluetooth and Investigating the Range Analysis. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 12-19.
- Yessad, N., Omar, M., Tari, A., & Bouabdallah, A. 2018. QoS-based routing in Wireless Body Area Networks: a survey and taxonomy. *Computing*, 245-275.
- Zigbee Specification. 2015. Zigbee Alliance. http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2011/kjb79_ajm232/pmeter/ZigBee Specification.pdf.



TÜRKİYE VE CİVARI SİSMİK MOMENT TENSÖR KATALOĞU: 2016-2019

Selda ALTUNCU POYRAZ*, Doğan KALAFAT, Yavuz GÜNEŞ, Fatih TURHAN, Remzi POLAT

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Değerlendirme Merkezi (BDTİM)

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Moment Tensör Kataloğu, Türkiye, Kaynak Parametreleri.</i>	2005 yılından beri Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE), Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM) Türkiye ve civarında meydana gelen büyüklüğü $M \geq 4.5$ olan depremler için kaynak parametrelerini belirlemekte ve çözümlerini araştırmacılar için paylaşmaktadır. Bu çalışmada da büyüklüğü $M \geq 4.2$ olan 146 deprem için (2016-2019) BDTİM ve Başbakanlık İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi (AFAD)'ne ait yakın-alan ve bölgesel dalga şekilleri kullanılarak kaynak parametreleri bulunmuştur. KDRAE-BDTİM tarafından oluşturulan moment tensör kataloğunun araştırmacılar için güvenilir bir kaynak olacağı düşünülmektedir. Ayrıca 2016-2019 yılları arasında meydana gelen ülkemiz için önem teşkil edecek 3 önemli depremin (Ayvacık-Çanakkale 2017, Gökova 2017 ve Ege Denizi 2017) depremselliği de çalışma kapsamında irdelenmiştir.

SEISMIC MOMENT TENSOR CATALOG OF TURKEY AND SURROUNDING REGION: SOLUTIONS FOR YEAR 2016-2019

Keywords	Abstract
<i>Moment Tensor Catalogue, Turkey, Fault Parameters.</i>	Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI), Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center (RETMC) determine source parameters and share results to researchers for earthquakes with magnitude ≥ 4.5 in Turkey and surrounding region since 2005. In this study, source parameters for 146 earthquakes with a magnitude of $M \geq 4.2$ (2016-2019) were found by using the near-field and regional waveforms of KOERI-RETMC and Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency Prime Ministry Disaster and Emergency Management Presidency Earthquake Department (AFAD). It is thought that the moment tensor catalog created by KDRAE-BDTİM will be a reliable source for the researcher. In addition, the seismicity of 3 important earthquakes happened in Turkey of years 2016-2019 (Ayvacık-Çanakkale 2017, Gökova 2017 and Aegean Sea 2017) were also examined in this study.

Alıntı / Cite

Altuncu Poyraz, S., Kalafat, D., Güneş, Y., Turhan, F., Polat, R., (2020). Türkiye ve Civarı Sismik Moment Tensör Kataloğu: 2016-2019, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1150-1164.

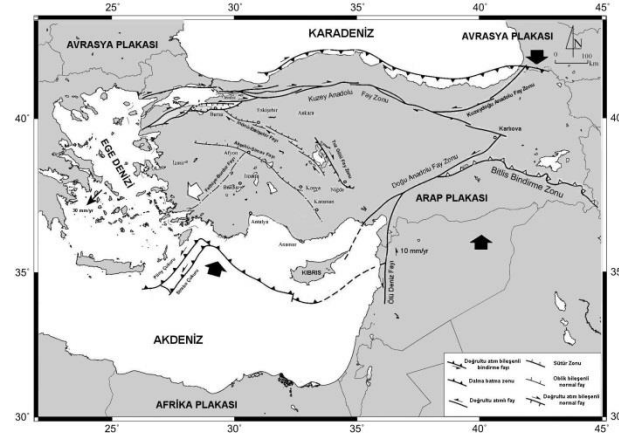
Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
S. Altuncu Poyraz, 0000-0003-1270-4518	Başvuru Tarihi / Submission Date 03.09.2020
D. Kalafat, 0000-0002-4888-3311	Revizyon Tarihi / Revision Date 07.10.2020
Y. Güneş, 0000-0002-1721-7324	Kabul Tarihi / Accepted Date 14.10.2020
F. Turhan, 0000-0003-4612-7421	Yayın Tarihi / Published Date 25.12.2020
R. Polat, 0000-0002-4071-6703	

1. Giriş (Introduction)

Anadolu levhasının bulunduğu güncel tektonik nedeniyle, ülkemiz diri fayların en fazla olduğu ülkelerden birisidir. Alpin sıradağlar kuşağı içinde bulunan Türkiye'de gerek Alp-öncesi orojenik hareketlerin ve gerekse Alpin hareketlerinin etkileri, ülkemizin değişik bölgelerinde etkisini göstermektedir (Ketin, 1959). Alp-himalaya dağ oluşum kuşağında olan ülkemiz Arap, Afrika ve Avrasya plakası olmak üzere üç ana levha tarafından kontrol edilmektedir. Arap-Afrika levhaları ile Avrasya levhaları arasında sıkışan Anadolu bloğunda doğuda kıta-kıta

* İlgili yazar / Corresponding author: selda.altuncu@boun.edu.tr

çarpışması sonucu ülkemizi günümüzde etkileyen birden fazla neotektonik olaylar gelişmiştir. Anadolu Levhası üzerinde görülen jeolojik ve tektonik yapıların çoğu bu tür bir hareket sonucu oluşmaktadır. Günümüzde yapılmakta olan GPS çalışmaları, Afrika Levhasının yaklaşık 10 mm/yıl (Barka ve Reilinger, 1997) gibi bir hızla kuzeye hareket ettiğini gösterirken, Arap Levhasının yaklaşık 25 mm/yıl (McClusky ve diğ., 2000; Reilinger ve diğ., 1997; Oral ve diğ., 1995; DeMets ve diğ., 1994) bir hızla K-KB doğrultusunda hareket ettiğini göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye'nin ana tektonik yapıları (Koçyiğit, 2008; Veen, 2008'den değiştirilerek) (Main tectonic structures of Turkey)

Depremlerin odak mekanizmaları sismoloji merkezleri tarafından çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Bu bilgiler depremlerin dinamiğini ve devam eden güncel tektoniği anlamak için önem arz etmektedir. Odak mekanizması kataloğu çalışmaları bir çok araştırmacı tarafından yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir (Kalafat ve diğ., 2009; Kalafat, 2019; Ekstrom ve diğ., 2003, 2005; Pondrelli ve diğ., 2007, 2011; Nakano ve diğ. 2010, Cambaz ve Mutlu 2016).

2005 yılından itibaren BDTİM kurumsal olarak büyüklüğü 4.5 ve üzeri ($M \geq 4.5$) depremler için moment tensör çözümü yapmakta ve sonuçları Avrupa-Akdeniz Sismoloji Merkezi'ne (European Mediterranean Seismological Center -EMSC) düzenli olarak göndermektedir (EMSC, 2020). Ayrıca çözümü yapılan depremler; <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/moment-tensor-cozumleri/> linkinden BDTİM tarafından paylaşılmaktadır.

Bu çalışmada BDTİM tarafından oluşturulan deprem kataloğundan 2016-2019 yılları arasında meydana gelmiş $M \geq 4.2$ üzeri depremler sorgulanmış ve toplam 146 deprem için moment tensör ters çözüm yöntemi kullanılarak, odak mekanizması parametreleri bulunmuştur. En büyüğü $M_L 7.2$ olan bu depremlerin moment tensör analizi yapılarak kaynak parametreleri belirlenmiştir. Yukarıda bahsi geçen mekanizma çözümleri hızlı bir şekilde yapıлып yer bilimlileri camiası ve araştırmacılar ile paylaşılmaktadır. Bu makalede 146 deprem için odak mekanizması çözümleri tekrar değerlendirilmiş ve BDTİM deprem istasyonlarının yanısıra AFAD'a ait deprem istasyonları kullanılarak çözüm kalitesi artırılmıştır. Depremler ve odak mekanizması parametrelerinin tablosu (Tablo 1) ek olarak verilmektedir. Ayrıca 2016-2019 yılları arasında meydana gelen üç önemli deprem için (Ayvacık-Çanakkale Depremi, Gökova Depremi ve Ege Denizi Depremi) deprensellik çalışması yapılarak, depremler hakkında kısa bilgilere yer verilmiştir.

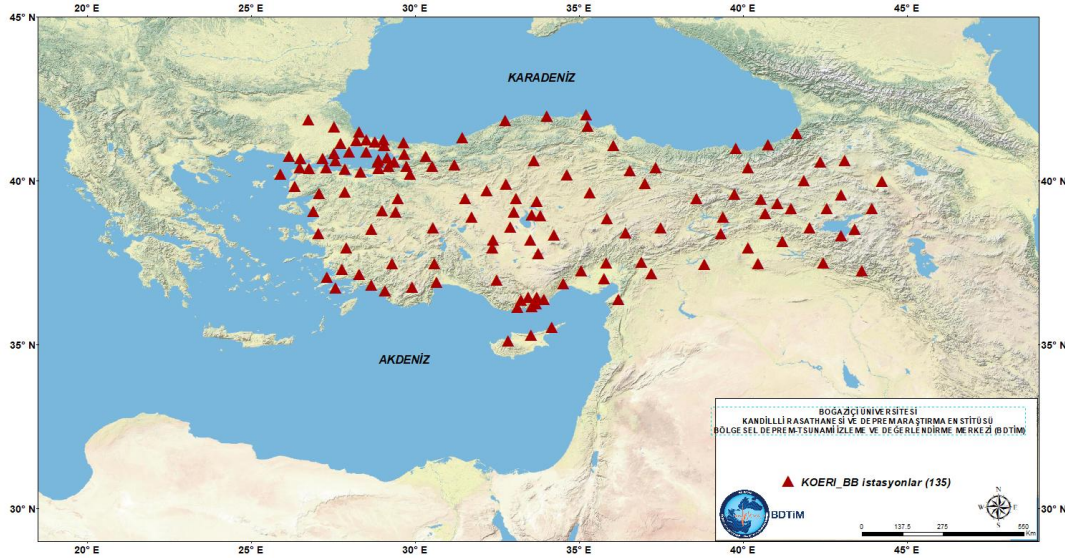
2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Gerek aletsel dönem ve tarihsel katalog çalışmaları (Guidoboni ve Comastri, 2005; Shebalin ve Tatevossian, 1997; Soysal et al., 1981; Tan vd., 2008; Kalafat vd., 2009; Ambraseys ve Finkel 2005; Ambraseys and Jackson 2008; Kılıç ve Utkucu, 2012) gerekse odak mekanizma çalışmaları ve katalog oluşturma tüm dünyada ve ülkemizde birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Burada önemli olan doğru ve güvenilir deprem parametrelerinin sunulmasıdır. Günümüzde meydana gelen depremlerin oluşumlarını anlamak ve güncel tektoniği yorumlamak için güvenilir odak mekanizması parametrelerini sunmak son derece önem arz etmektedir. Odak mekanizma çözümlerinde kullandığınız istasyon sayısı ve istasyonların dağılımı, kullanılan kabuk yapısı, deprem lokasyonu ve derinliği mekanizma çözümlerinin sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada sadece KOERI istasyonları değil aynı zamanda AFAD istasyonları kullanılmış ve kullanılan istasyonların deprem lokasyonunu çevrelemesine dikkat edilmiştir. Ayrıca katalog güncel katalogdur. Güncel depremlerin (son 2-3 yıl) odak mekanizmalarının sunulduğu herhangi bir makale çalışması henüz yayınlanmamıştır. Bu çalışma bu açıdan araştırmacılar için güvenilir bir veri tabanı oluşturacaktır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu çalışmada kullanılan veri, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve DAE (KRDAE), BDTİM tarafından işletilen sismik ağdaki 3 bileşenli genişbant deprem istasyonları ve İçişleri Bakanlığı Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından 2005 yılında başlatılan Ulusal Sismik Ağın Geliştirilmesi (USAG) projesindeki genişband (broandband) deprem istasyonlarıdır (AFAD, 2020). Çözümde kullanılan AFAD istasyonları verileri Guralp CMG-3TD modeli genişbant sismograflarca (120 sn periyotlu) kaydedilen sismogramlardır. Moment tensör ters çözüm işlemi uygulanırken, kullanılan programda çözüme girecek verilerin geniş bantlı (broad-band) istasyonlara ait sismogram kayıtları olması gerekir. KRDAE-BDTİM ait geniş band istasyonlar Şekil 2’de gösterilmektedir (Kandilli, 1971).

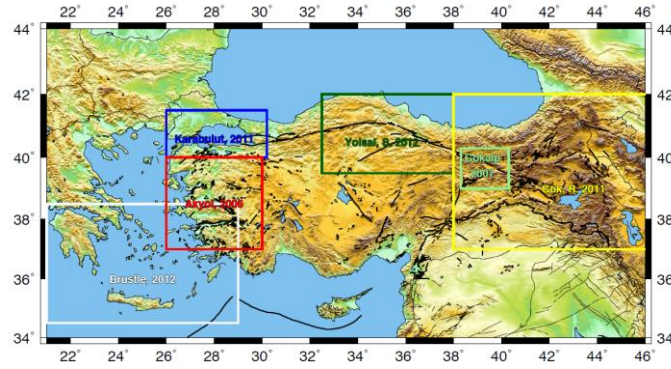


Şekil 2. KRDAE-BDTİM tarafından işletilen Geniş-bant deprem istasyonları (Broad-band earthquake stations that are operated by KOERI-REMTC)

Moment Tensör çözümleri yapılırken Sokos and Zahradnik (2006) tarafından yazılan ve nokta kaynak iteratif dekonvolüsyonunu kullanan ISOLA yazılımı kullanılmıştır. ISOLA programı Kikuchi ve Kanamori (1991) yönteminden lokal ve bölgesel depremlerin kaynak parametrelerini yüksek hassasiyet ile belirlemek üzere geliştirilmiştir. Paketin en önemli avantajlarından bir tanesi kaynak mekanizması belirlenecek depremin bulunduğu lokasyon için lokal kabuk modellerinin kullanımına ve bu kabuk modellerine göre hesaplanan green fonksiyonlarına göre çözüm yapılmasına imkan sağlamasıdır. Çözüm girecek sayısal verinin örnekleme aralığı ve hesaplanan sentetik verinin örnekleme aralığı aynı birimde olmalıdır. İşlem aşamalarını kısaca özetlersek; (a) geniş bant hız verilerinin yer değiştirmeye dönüştürülmesi, (b) programa tanımlanan kabuk modeli kullanılarak sentetik sismogramların üretilmesi ve (c) sentetik veri ile gözlenen yani gerçek veriyi birbirine yakınsatacak en iyi kaynak şeklinin bulunması şeklinde üç temel aşamada gerçekleşmektedir. Sentetik veriler programa girilen kabuk yapısına göre kullanıcı tarafından hesaplandığı için örnekleme aralığı ve birimi kullanıcının kontrolindedir.

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Bu çalışmada kullanılan ISOLA yazılımında sentetik sismogramlar yer değiştirmenin fonksiyonu olarak hesaplanmıştır ve genliklerin birimi cm olarak kullanılmıştır. Moment tensör ters çözüm yapılırken bölgelere göre farklı kabuk yapıları kullanılmıştır (Yolsal ve vd., 2012; Karabulut ve vd., 2011; Brüstle, 2012; Gökalp 2007; Akyol ve vd., 2006; Gallovic vd., 2013; Şekil 3). Haritada karelerin dışında kalan alanlar için kullanılan kabuk yapısı Kalafat vd. (1987) nin bulduğu kabuk yapısıdır. Bu kabuk yapısı şu an BDTİM merkezinde aktif olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. Odak mekanizması çözümleri için kullanılan kabuk yapıları (Crustal structures used for focal mechanism solutions)

Güvenilir sonuçların elde edilmesi için programa girdiğimiz ilksel derinlik ve lokasyon bizim belirlediğimiz aralıklarla VR (variance reduction) değerinin en düşük olduğu değere kadar tekrarlanır ve en uygun çözüm iterasyon işlemi sonucu bulunur. Derinlikde belirlenen artışlar depremden depreme değişmektedir.

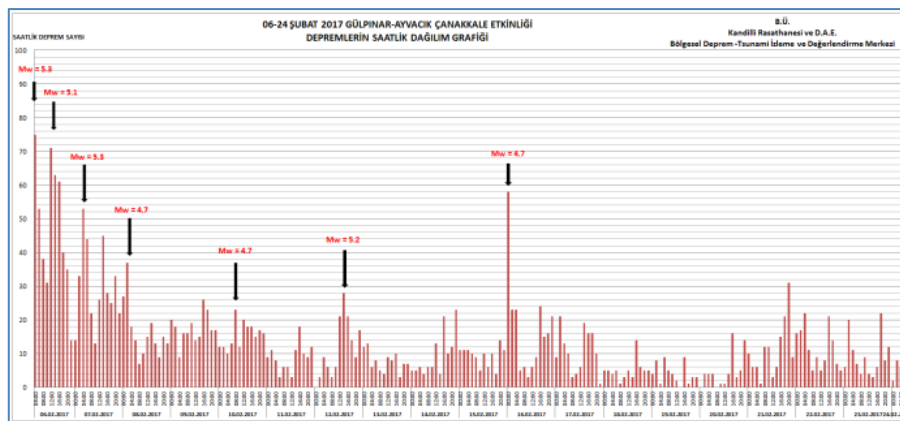
4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. Deprem Etkinlikleri (Earthquake activities)

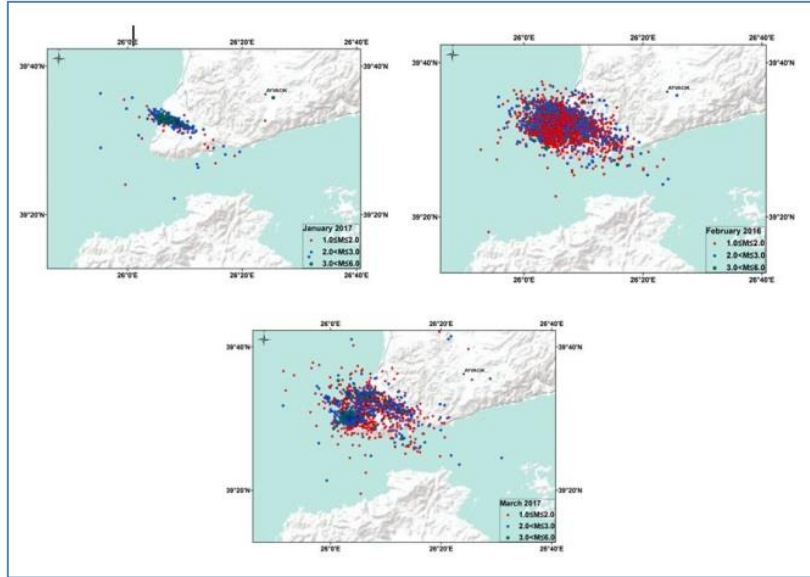
4.1.1. Ayvacık-Çanakkale Deprem Etkinliği (Ayvaci-Çanakkale earthquakes activity)

06 Şubat 2017 tarihinde büyüklüğü Mw:5.3 ve merkez üssü Ayvacık-Çanakkale olan bir deprem etkinliği başlamış ve artçılar üç ay sürmüştür. Üç adet büyüklüğü 5 ve üzeri deprem meydana gelmiştir. Bunlar sırasıyla; 06.02.2017 13:58 Mw:5.1, 07.02.2017 05:24 Mw:5.3, 12.02.2017 16:48 Mw:5.2 depremleridir (Şekil 4). Şekil 4’de 06-24 Şubat tarihleri arasında meydana gelen depremlerin saatlik dağılımı verilmektedir. Düşey eksen meydana gelen depremlerin sayısını göstermektedir. Şekil 5’de Ocak, Şubat ve Mart aylarına ait deprem aktivitesi gözlenmektedir. KRDAE-BDTİM tarafından yapılan lokasyon çözümlerine baktığımız zaman etkinliğin deprem dizileri şeklinde meydana geldiği gözlenmektedir.

Batı Anadolu’da gözlenen deprem oluş düzeni, içinde deprem dizilerini barındıran deprem fırtınaları şeklindedir. Deprem dizileri özellikle ikincil aktif tali fay zonlarında görülen bir deprem oluş düzenidir. Bu tür ikincil fay zonlarında genelde 4-6 fay parçası bulunmaktadır. Ve zaman içerisinde bu fay parçalarının miktarı ve uzunluklarına bağlı olarak arka arkaya yoğun deprem etkinlikleri meydana gelir. Kırılan bir parça sonrası o depreme ait artçılar meydana gelirken, kırılan parçanın komşu parçaya gerilme yüklemesinden dolayı diğer parça kırılır ve art arda diğer parçalar kırılarak bölgede seri depremler meydana gelir. Deprem dizileri ana şoku takip eden süreçte birbirine yakın büyüklükte depremler üretirler ($M=5.2-5.5$) fakat daha sonra aktivite sıklığı ve şiddeti azalarak sönümlenir. Bu sönümlenme haftalarca hatta aylarca sürebilmektedir (Kalafat ve diğ., 2008). Bu tür deprem aktivitelerine özellikle güney batı Anadolu kıyıları, Denizli ve civarı, Midilli-Edremit ve Karaburun açıkları, Oniki Adalar ve Marmaris ve civarlarında rastlamak mümkündür.

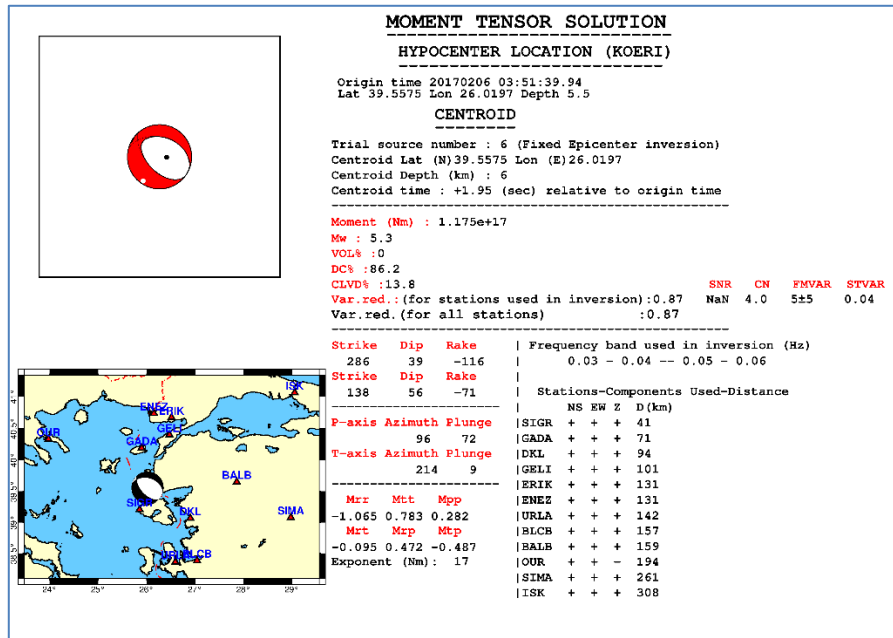


Şekil 4. Ocak, Şubat ve Mart aylarına ait Ayvacık-Çanakkale deprem aktivitesi (Altuncu Poyraz vd., 2017) (Ayvaci-Çanakkale earthquakes activities for January, February and March in the study area)



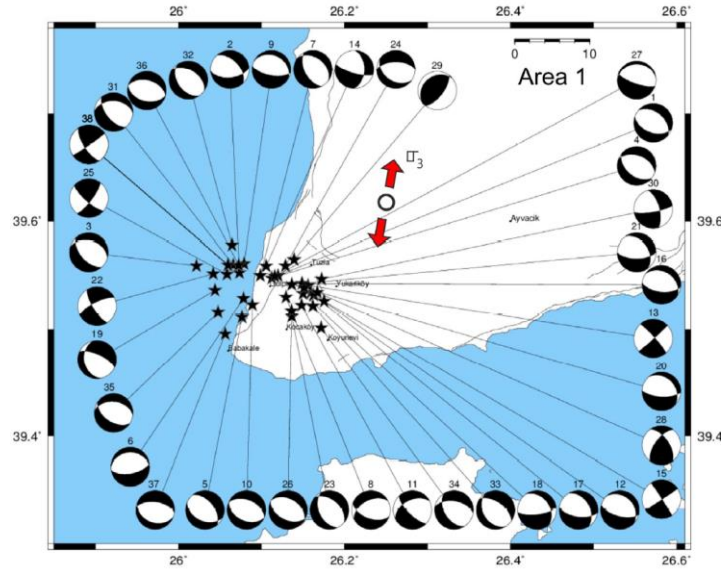
Şekil 5. Ayvacık-Çanakkale deprem aktivitesi (Ocak, Şubat ve Mart 2017), (Altuncu Poyraz vd., 2017) (Locations map of seismic activities of January 2017 to March 2017 in the study area)

Depremlerin çoğunun Tuzla ile Assos arasındaki alanda meydana geldiğini ve Tuzla fayı'nın deformasyon zonu boyunca ve fayın düşen bloğu üzerinde olduğunu gözlemlemekteyiz. Deprem sığ odaklı bir deprem olup derinliği 6 km. civarındadır. Ayvacık-Çanakkale deprem etkinliğinde büyüklüğü $M \geq 3.5$ olan 38 adet depreme ait Isola programı kullanılarak yapılan mekanizma çözümleri Şekil 7'de verilmektedir (Özden vd., 2018). Ana şokun mekanizma çözümü ise Şekil 7'de görülmektedir. Şekil 7'de ki mekanizma çözümlerine baktığımız zaman fayların düşey atımlı normal faylanma karakteri gösterdiği açıkça görülmektedir Bu çözümler bize Batı Anadolu'da egemen olan açılma tektonik rejiminin halen devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 6. 06.02.2017 03:51 (UTM) depremine ait faylanma çözümü ve parametreleri (The focal mechanism solution for 06.02.2017 03:51 (UTM) earthquake)

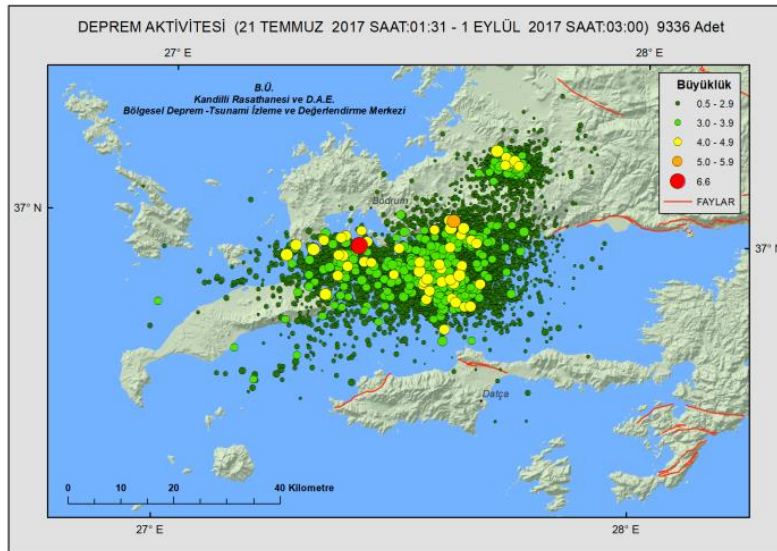
Depremlerin lokasyonlarına baktığımız zaman dış merkezlerin birbirine çok yakın olduğunu görüyoruz. Bu da bize depremin aynı fay mekanizması içinde ve oldukça dar bir alanda meydana geldiğini gösteriyor (Şekil 7). Şekil 7'deki odak mekanizması sonuçları KB-GD uzanımlı eğim atımlı normal faylanmaya işaret etmektedir.



Şekil 7. 14 Ocak ve 27 Mart 2017 tarihleri arasında bölgede meydana gelen 38 adet depremin ($M \geq 3.5$) odak mekanizması sonuçları (Özden vd., 2018) (The moment tensor solutions of the 38 earthquakes ($M \geq 3.5$) in the study area between 14 January and 27 March 2017)

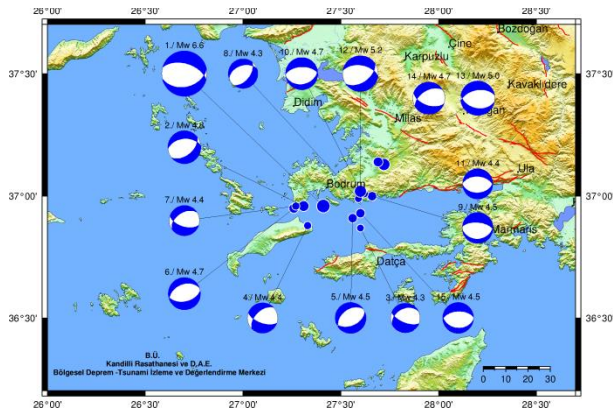
4.1.2. Gökova Deprem Etkinliği (Gokova Earthquake Activity)

Gökova Körfezi'nde 21 Temmuz 2017 tarihinde, yerel saat 01:31'de büyüklüğü (magnitüdü) $M_w:6.6$ olan büyük bir deprem gerçekleşmiştir. Depremin sığ odaklı olup derinliği 6 km civarındadır. Deprem bölgede etkin bir şekilde hissedilmiştir. Depremin olduğu alan ve civarında aletsel dönemde (1900 yılı sonrası) meydana gelmiş en yıkıcı deprem 1926 yılı Oniki Adalar-Akdeniz ($M_s:7.7$) depremidir. Diğer önemli deprem de 1941 yılında Muğla'da ($M_s:6.5$) olmuştur. KRDAE-BDTİM tarafından bölgede kaydedilen deprem sayısı 9336 ($0.5 \leq M \leq 6.6$) (01.09.2017 tarihine kadar), (Şekil 8).



Şekil 8. Gökova deprem etkinliği (Seismic activities of Gokova earthquake) (KRDAE-BDTİM, 2017)

Ülkemizde deprem etkinliğinin en fazla görüldüğü bölgelerden biri Girit Yayı-Oniki Adalar civarındır. Bunun nedeni Afrika plakasının K-KD yönündeki hareketinin ve Anadolu bloğunun altına dalma olayının devam etmesidir. Deprem dizileri yani içinde deprem fırtınaları barındıran deprem aktiviteleri ülkemizde özellikle Milas-Bodrum-Gökova Körfezi ve Datça civarlarında yoğun olarak gözlenmektedir. Gökova körfezi'nde körfeze paralel normal faylar bulunmaktadır ve bu deprem bu faylar tarafından denetlenmektedir. Bölgedeki tektonik yapıya baktığımız zaman körfezin kuzey kolunu oluşturan doğu-batı gidişli normal faylar ve bu faylar ile bağlantılı olan ve karaya doğru uzanan genel olarak KD-GB ve KB-GD gidişli normal ve doğrultu atım bileşeni olan faylar gözlenmektedir. Gökova etkinliğinde büyüklüğü $M \geq 4.0$ ve üzeri toplam 15 adet depremin mekanizma çözümü yapılmıştır (Şekil 9).

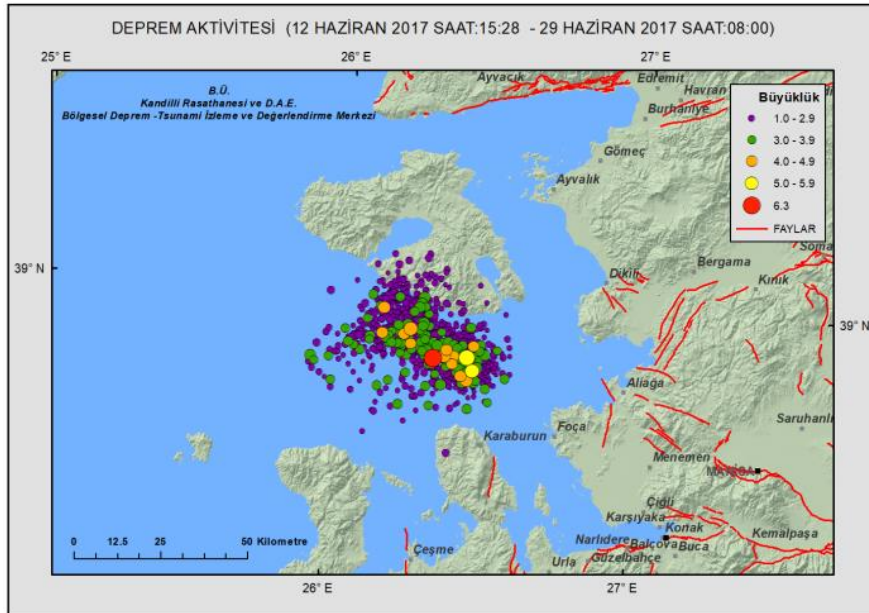


No	Tarih	Saat	Enlem N	Boylam E	Derinlik	Mw	
1/	Mw 6.6	20.07.2017	22:31:09.18	36.96	27.41	6	6.6
2/	Mw 4.8	20.07.2017	23:23:51.44	36.96	27.31	10	4.8
3/	Mw 4.3	21.07.2017	01:38:50.20	36.87	27.60	7	4.3
4/	Mw 4.4	21.07.2017	02:12:33.99	36.88	27.33	10	4.4
5/	Mw 4.5	21.07.2017	05:03:59.48	36.91	27.56	6	4.5
6/	Mw 4.7	21.07.2017	17:09:46.40	36.95	27.26	11	4.7
7/	Mw 4.4	22.07.2017	17:09:20.21	36.96	27.27	10	4.4
8/	Mw 4.3	30.07.2017	07:02:12.70	36.99	27.59	6	4.3
9/	Mw 4.5	30.07.2017	17:51:18.34	37.00	27.66	6	4.5
10/	Mw 4.7	07.08.2017	05:18:47.78	37.02	27.60	6	4.7
11/	Mw 4.4	08.08.2017	01:46:19.44	37.01	27.62	10	4.4
12/	Mw 5.2	08.08.2017	07:42:19.65	37.02	27.60	6	5.2
13/	Mw 5.0	13.08.2017	11:46:51.88	37.13	27.72	6	5.0
14/	Mw 4.7	14.08.2017	02:43:48.22	37.14	27.69	10	4.7
15/	Mw 4.5	18.08.2017	14:10:47.33	36.93	27.60	10	4.5

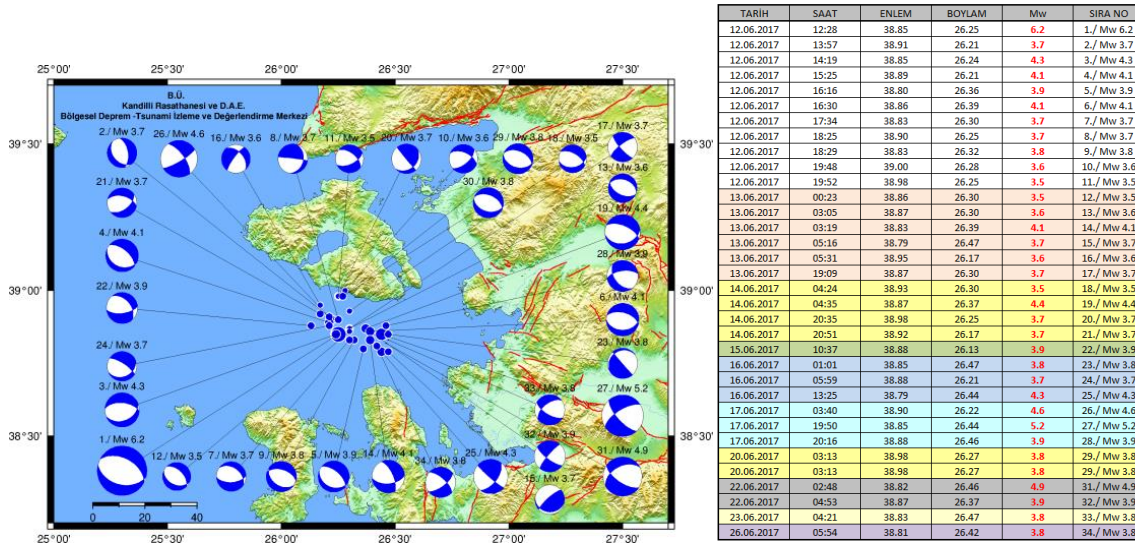
Şekil 9. Gökova deprem etkinliğinde meydana gelen büyüklüğü $M \geq 4.0$ üzeri depremlerin odak mekanizması sonuçları (The focal mechanism solutions of the 15 earthquakes ($M \geq 4.0$) for Gokova seismic activities) (KRDAE-BDTİM, 2017)

4.1.2. Ege Denizi Deprem Etkinliği (Aegean Sea Earthquake Activity)

12 Haziran 2017 tarihinde Karaburun Açıkları -Ege Denizi'nde yerel saat ile 15:28'de aletsel büyüklüğü $M_w:6.2$ olan şiddetli bir deprem meydana gelmiştir. Deprem sıg odaklı olup derinliği 20 km civarındadır. 12-29 Haziran arasında meydana gelen depremlerin dağılımları Şekil 10'da görülmektedir. Deprem İzmir, Manisa, Aydın, Balıkesir ve İstanbul olmak üzere geniş bir alanda hissedilmiştir. Bölgede meydana gelen etkili depremler (aletsel dönem) sırasıyla; 1981 yılı Ege Deniz Depremi $M_s:7.2$, 1968 Ege Denizi $M_s:7.0$, 1919 yılı Ayvalık-Canakkale $M_s:7.0$ ve 1944 yılı Edremit Körfezi $M_s:6.8$ büyüklüğündeki depremlerdir. Afrika ve Avrasya plakaları arasında kalan bölge en aktif deprem ve deformasyon bölgeleri arasında yer almaktadır. Bunun nedeni bölgenin Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAF)'in doğrultu atımlı tektonik hareketi ve Batı Anadolu'nun açılma rejiminden etkilenmesidir. Bu tektonik özellikler nedeniyle gerek tarihsel gerek aletsel dönemde bölgede şiddetli depremler olmuştur. Aktivite süresince $M \geq 3.5$ olan toplam 34 adet depremin mekanizma sonucu Şekil 11'da verilmektedir. Mekanizma sonuçları günümüz tektonik rejimi yansıtmaktadır.



Şekil 10. Ege Denizi deprem etkinliği (Seismic activities of Aegean Sea earthquake) (KRDAE-BDTİM, 2017b)



Şekil 11. Ege Denizi deprem etkinliğinde meydana gelen büyüklüğü $M \geq 3.5$ üzeri depremlerin odak mekanizması sonuçları (The focal mechanism solutions of the earthquakes ($M \geq 4.0$) for Aegean Sea seismic activities)

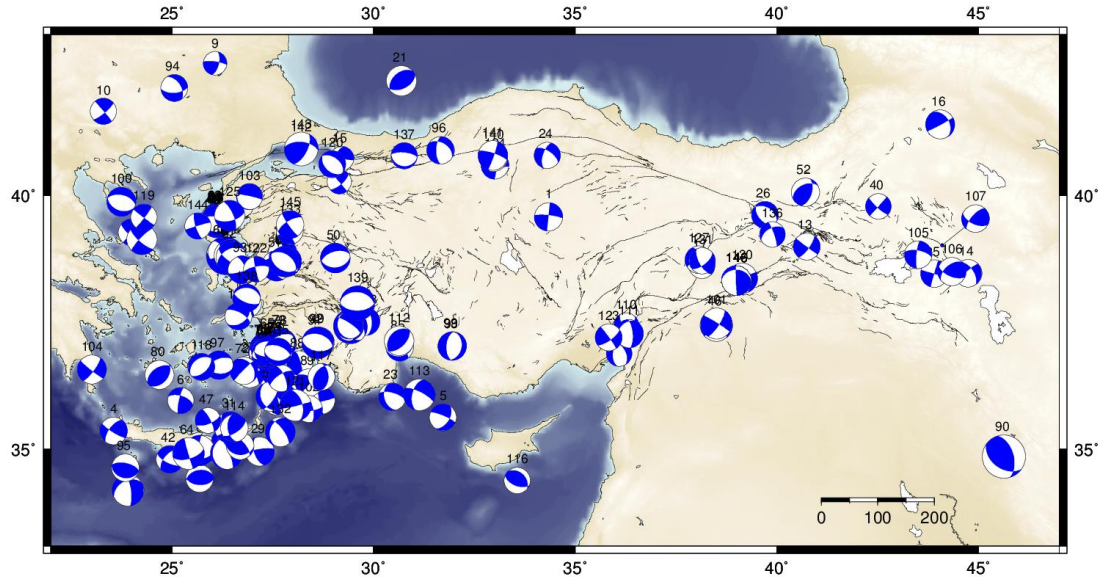
5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada 2016-2019 yılları arasında meydana gelen büyüklüğü $M \geq 4.2$ olan toplam 146 depremin odak mekanizması çözümleri yapılarak, kaynak parametreleri ek olarak Tablo 1 ve Şekil 12 'de verilmektedir. Çalışma kapsamında fay düzlemi çözümleri yapılan depremler özellikle yoğun olarak batı Anadolu kıyıları, Onikiadalar-Girit yayı arası, Antalya Körfezi-Kıbrıs arası, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun batı ve orta kesimi, ve Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca meydana gelmiştir. Batı anadoluda meydana gelen depremler genel olarak eğim atımlı normal faylanmalar vermektedir, bu ise açılma rejiminin bölgede etkili olduğunu ve sürmekte olduğunu göstermektedir.

Girit yayı-Oniki adalar bölgesinde ise daha karışık bir tektonik deformasyonun hakim olduğunu, oblik faylanmaların, ters ve normal faylanmaların birlikte görüldüğü, dolayısı ile bölgede karmaşık bir tektonik sürecin hüküm sürdüğünü göstermektedir.

Doğu Anadolu fay zonunda meydana gelen depremlerin fay düzlemi çözümleri ise genelde doğrultu atımlı faylanmalar vermekte ve güncel tektonik rejimi deteklemektedir.

2016-2019 yılları arasında Türkiye ve civarında kaydedilen en büyük deprem 12 Kasım 2017'de Irak-Türkiye sınırında meydana gelen depremdir ve çalışılan depremler arasında en büyük sismik moment değerine sahiptir ($5.91e+16$ Nm, $M_w:7.1$). Genel olarak elde edilen mekanizma çözümleri bölgesel tektonik ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 12. Moment tensör ters çözüm yöntemi ile bulunan 146 depreme ait odak mekanizma çözümleri (Focal mechanism solutions for 146 earthquakes using moment tensor inversion method)

Teşekkür (Acknowledgement)

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi çalışanlarına teşekkürü bir borç biliriz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- AFAD Acil ve Afet Durum Yönetim Başkanlığı, (2020). Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/istasyonlar>.
- Akyol, N., Zhu, L., Mitchell, B., Sözbilir, H., Kekovalı, K. 2006. Crustal Structure and Local Seismicity in Western Anatolia. *Geophysical Journal International* 166, 1259–1269.
- Altuncu Poyraz, S., Pınar, A., Kekovalı, K., Güneş, Y., Kalafat, D., Ergün, T., Cambaz, D., Köseoğlu, A., Ögütçü, Z., Kara, M., Akkoyunlu, M., Pektaş, R., Çomoğlu, M., Yılmaz, M., Özdemir, F., Hisarlı, P., Aksarı, D., Polat, R., Çetin, S., Gül, M., 2017. 2017 yılı Ayvacık-Çanakkale Deprem Aktivitesinin Sismotektonik Özellikleri. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (TDMSK).
- Ambraseys, N.N., Finkel C.F. 1995. Türkiye’de ve Komşu Bölgelerde Sismik Ekinlikler; Bir Tarihsel İnceleme 1500-1800. TÜBİTAK Yayınları Akademik Dizi-4.
- Ambraseys, N.N., 1998. Faulting Associated with Historical and Recent Earthquakes in the Eastern Mediterranean Region. *Geophysical Journal International* 133 (1998), 390–406.
- Brüstle, A., 2012. Seismicity of the Eastern Hellenic Subduction Zone. Doktora Tezi. Almanya.
- Barka, A. ve Reilinger, R., 1997. Active Tectonics of the Eastern Mediterranean region: Deduced from GPS, Neotectonic and Seismicity Data. *Annali Di Geofisica*, 40, 587–610.
- Cambaz, M.D., Mutlu, A.K., 2016. Regional Moment Tensor Inversion for Earthquakes in Turkey and its Surroundings: 2008-2015. *Seismological Research Letters*, 87, 5.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S. 1994. Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions. *Geophysical Research Letters* 21. doi: 10.1029/94GL02118. issn: 0094-8276.
- Ekström, G., Dziewonski, A.M., Maternovska-ya, N.N., Nettles, M., 2003. Global Seismicity of 2001: Sentroid-Moment-tensor Solutions for 961 Earthquakes. *Physics of Earth Planetary Interior*, 13, 165-185.
- Ekström, G., Dziewonski, A.M., Maternovska-ya, N.N., Nettles, M., 2005. Global Seismicity of 2002: Sentroid-Moment-tensor Solutions for 1034 Earthquakes. *Physics of Earth Planetary Interior*, 148, 303–326.
- European Mediterranean Seismological Center (EMSC), (2020). Moment Tensor Web Sayfası. https://www.emsc-csem.org/Earthquake/index_tensors.php.
- Gallovic, F., Ameri, G., Zahradnik, J., Plicka, V., Sokos, E., Askan, A., Pakzad, M., 2013. Fault Process and Broadband Ground-Motion Simulations of the 23 October 2011 Van (Eastern Turkey) Earthquake. *Bulletin of the Society of America*, 103 (6), 3164-3178.
- Gökalp, H., 2007. Local Earthquake Tomography of the Erzincan Basin and the Surrounding Area in Turkey. *Annal Geophysics*, 50(6), 707-724.

- Guidoboni E., Comastri A., 2005. Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean Area from the 11th to the 15th century. INGV-SGA, Bologna.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Güneş, Y., Yılmaz, M., Kara, M., Deniz, P. and Berberoğlu, M., 2009. Türkiye ve Çevresi Faylanma-kaynak Parametreleri (MT) kataloğu (1938-2008). Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Ocak 2009, İstanbul.
- Kalafat, D., Gürbüz, C., Üçer, B., 1987. Batı Türkiye'de Kabuk ve Üst Manto Yapısının Araştırılması. Deprem Araştırma Bülteni, 59, 43-64.
- Kalafat, D., K. Kekovalı, P. Deniz, Y. Güneş, A. Pınar, G. Horasan., 2008. 31 Temmuz 2005-1 Ağustos 2005 ve 20-27 Aralık 2007 Afşar-Bala (ANKARA) Deprem Dizisi : July 31, 2005 -August 1, 2005 and December 20-27, 2007 Afşar-Bala (ANKARA) Earthquake Sequence. İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 21 (2), 47-60.
- Kalafat, D., 2019. A Focal Mechanism Solution Catalog of Earthquakes ($M \geq 4.0$) in and around the Turkey for 1912-2018. Abstract Number: S43F-0649*; Session Number and Title: S43F; AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, CA, USA.
- Kandilli Observatory And Earthquake Research Institute, Boğaziçi University, (1971). Bogazici University Kandilli Observatory And Earthquake Research Institute [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/KO>.
- Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi Gökova Deprem Etkinliği Raporu, (2017a). <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2017/07/Gokova.Korfezi.v4.pdf>,
- Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi Ege Denizi Deprem Etkinliği Raporu, (2017b). http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wpcontent/uploads/2017/06/12_HAZIRAN_2017_EGE_DENIZI_DEPREMI.pdf
- Karabulut, H., Schmittbuhl, J., Özalaybey, S., Lengliné, O., Kömeç-Mutlu, A., Durand, V., M Bouchon, M., Daniel, G., Bouin, M.P., 2011. Evolution of the Seismicity in the Eastern Marmara Sea a Decade Before and After the 17 August 1999 Izmit earthquake. Tectonophysics, 510, 17-27.
- Ketin, İ., 1959. Türkiye'nin Orojenik Gelişmesi. M.T.A. Derg., no. 53, Ankara.
- Kikuchi, M. and Kanamori, H., 1991. Inversion of Complex Body Waves-III. Bull. Seismol. Soc. Am., 81, 2335-2350.
- Koçyiğit, A., 2008. Active Tectonics of the Ağlasun-Gölcük (Isparta) Area: Type of Neotectonic Regime and the Source of the Sagalossos Historical Earthquakes. Aktif Tektonik Araştırma grubu (ATAG) 12, Bildiri Özleri Kitabı.
- Kılıç, T ve Utkucu, M., 2012. Türkiye'deki $M \geq 4.0$ Depremler İçin 2007 ve 2008 Yıllarını Kapsayan Sismik Moment Tensör Katalogu. İstanbul Üniversitesi, Yerbilimleri Dergisi, 33 (39), 141-168.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gürkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Nadariya, M., Ouzouni, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tea-leb, A., Toksöz, M.N. ve Veis, G., 2000. GPS Constraints on Plate Kinematics and Dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. Journal of Geophysical Research, 105, 5695-5719.
- Nakano, M., Yamashina, T., Kumagai, H., Inoue, H. and Sunarjo, 2010. Sentroid Moment Tensor Catalogue for Indonesia. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 183, 456-467.
- Oral, B.M., Reilinger, R.E., Toksöz, M.N., King, R.W., Barka, A.A., Kinik, I., Lenk, O., 1995. Global Positioning System Offers Evidence of Plate Motions in Eastern Mediterranean. EOS, 76, 9-11.
- Özden S., Över, S., Altuncu Poyraz, S., Güneş, Y., Pınar, A., 2018. Tectonic Implications of the 2017 Ayvacık (Çanakkale) Earthquakes, Biga Peninsula, NW Turkey. Journal of Asian Earth Sciences, 154, 125-141.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Morelli, A., Ekström, G., Boschi, E., 2007. European-Mediterranean Regional Sentroid Moment Tensor Catalog: Solutions for Years 2003 and 2004. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 164 (1-2), 90-112.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Morelli, A., Ekström, G., Postpischla, L., Vannuccia, G., Boschi, E., 2011. European-Mediterranean Regional Sentroid Moment Tensor Catalog: Solutions for 2005-2008. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 185, 74-81.
- Reilinger, R.E., McClusky, S.C., Oral, M.B., King, W. ve Toksöz, M.N., 1997. Global Positioning System Measurements of Present-day Crustal Movements in the Arabian-Africa-Eurasia plate collision zone. J. Geophys. Res., 102, 9983-9999.
- Shebalin, NV., Tatevossian, RE., 1997. Catalogue of Large Historical Earthquakes of the Caucasus. In: Giardini D, Balassanian S (eds) Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 201-232.
- Soysal H., Sipahioglu S., Kolcak D., Altinok Y., 1981. Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Katalogu. TUBITAK, Proje no. TBAG 341, İstanbul.
- Tan, O., Tapırdamaz, C., Yörük, A., 2007. The Earthquakes Catalogues for Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences (Turkish J. Earth Sci.), 17, 405-418.
- Sokos, E. and Zahradnik, J. 2006. A Matlab GUI for Use with ISOLA Fortran Codes (User's Guide), Ver. 2.5. http://seismo.geology.upatras.gr/isola/uploads/1/4/2/6/1426498/old_isola_manual.pdf.
- Yolsal, S., Biryol, C., Susan, B., Zandt G., Taymaz T., Adıyaman, H., Özacar A.A., 2012. 3D Crustal Structure Along the North Anatolian Fault Zone in North Central Anatolia Revealed by Local Earthquake Tomography. Geophysical Journal International, 188(3), 819-849. ISSN: 0956540X.
- Ween, J.H., Boulton, S.J., Alçiçek, M.L., 2008. From Paleotectonics to Neotectonics in the Neotethys Realm: the Importance of Kinematic Decoupling and Inherited Structural Grain in SW Anatolia (Turkey). Tectonophysics. doi:10.1016/j.tecto.2008.9.030.

EK:

Tablo 1. Büyüklüğü $M \geq 4.5$ ve üzeri depremlerin odak mekanizması parametreleri (Focal mechanism solutions for $M \geq 4.5$)

No	Tarih Gün.Ay.Yıl	Zaman (UTC)	Enlem N (°)	Boylam E (°)	Düzlem 1 Doğrultu°/Atım°/Eği m°	Düzlem 2 Doğrultu°/Atım°/Eği m°	Mag. (Lokal)	Mag. (Moment)	Sismik Moment (nm)	Derinlik (km)	Kaynak derinliği (km)	VR(%)	Kullanıl n istasyon sayısı (KOERİ+ AFAD)
1	10.01.2016	17:40:48	39.597	34.3363	276/80/-180	186/90/-10	5.2	4.7	1.189e+16	5	12	50	15
2	05.02.2016	23:01:29	35.0045	25.8393	159/72/126	162/75/128	4.6	4.3	3.250e+15	11.6	12	55	6
3	18.02.2016	02:40:23	35.146	26.3293	21/43/-44	146/62/-123	4.6	4.6	1.00e+16	5.4	29	69	13
4	12.03.2016	12:40:38	35.3735	23.5597	217/63/11	122/81/153	4.7	4.5	8.00e+15	13.8	17	61	8
5	22.03.2016	13:25:15	35.6460	31.7212	293/79/-41	33/50/-165	4.7	4.4	5.13e+15	72.9	43	57	8
6	01.04.2016	14:30:47	35.9830	25.2182	288/60/12	351/59/17	4.5	4.3	3.00e+15	82.9	72	55	5
7	03.04.2016	00:46:20	34.4015	25.6923	260/40/80	93/51/98	4.6	4.6	1.13e+16	61.3	16	50	4
8	16.04.2016	00:10:38	34.9722	25.6890	187/83/-134	90/45/-10	4.8	5.0	3.57e+16	6.8	6	70	10
9	18.04.2016	06:46:14	42.4757	26.0703	14/63/14	44/78/152	4.5	3.9	7.67e+14	7.2	10	51	6
10	22.05.2016	08:58:31	41.5888	23.3053	50/78/-178	320/88/-12	4.6	4.3	3.07e+15	15	22	45	6
11	25.05.2016	08:36:13	34.9153	26.3610	337/77/-95	176/14/-71	5.4	5.3	1.13e+17	20	32	70	9
12	07.06.2016	04:09:45	40.2652	29.1523	140/89/21	50/69/179	4.6	4.0	2.01e+15	15.8	18	80	16
13	10.06.2016	18:57:01	39.0250	40.7383	126/89/-164	36/74/-1	4.5	4.4	5.546e+15	5.3	11	75	9
14	22.06.2016	10:47:04	38.5090	44.7362	227/78/-34	325/57/-166	4.5	4.5	6.135e+15	5	7	66	6
15	25.06.2016	05:40:11	40.7068	29.2122	190/48/3	98/88/138	4.5	4.0	1.30e+15	9.3	9	90	17
16	12.07.2016	10:14:02	41.3437	44.0470	329/37/176	63/88/53	4.8	4.8	2.06e+16	5	11	85	8
17	17.08.2016	01:07:02	38.6538	38.1392	131/71/108	265/26/47	4.5	4.3	3.735e+15	3	1	67	8
18	12.09.2016	08:26:04	38.8977	27.7433	76/88/-173	345/83/-2	5.0	4.8	2.00e+16	13.6	7	82	12
19	12.09.2016	09:29:37	38.8942	27.7323	256/86/164	347/74/4	4.6	4.5	8.00e+15	13.1	8	80	16
20	27.09.2016	20:57:07	36.3713	27.5942	107/56/53	340/48/131	5.3	5.1	5.927e+16	87.3	71	57	13
21	15.10.2016	08:18:32	42.1512	30.6945	64/48/100	229/43/79	5.0	5.0	2.658e+16	10.2	10	51	12
22	17.10.2016	01:30:30	37.9103	26.8778	331/79/-37	69/54/-167	4.7	4.5	7.72e+15	8.9	32	79	9
23	19.10.2016	12:18:45	36.0600	30.4670	286/66/-124	164/41/-39	4.7	4.5	7.20e+15	23.6	48	66	10
24	02.11.2016	11:57:42	40.7647	34.3108	304/63/-148	198/62/-31	4.7	4.3	3.134e+15	8.8	6	79	8
25	23.11.2016	12:14:34	38.4965	43.9057	106/89/178	196/88/1	4.8	4.5	6.250e+15	5	6	66	11

26	16.12.2016	21:21:48	39.6328	39.7052	300/41/-104	139/51/-78	4.4	4.4	5.942e+15	2	7	78	11
27	20.12.2016	06:03:48	36.5677	26.9252	324/72/154	63/65/19	5.4	5.3	1.04e+17	121.5	109	72	8
28	26.12.2016	05:53:31	32.3707	30.9340	82/85/-176	351/86/-5	4.5	4.4	4.47e+15	28	37	40	5
29	01.01.2017	13:03:59	34.9533	27.1827	162/58/164	260/76/33	4.7	4.8	2.230e+16	5	10	74	7
30	14.01.2017	22:38:59	39.5485	26.118	310/44/-75	110/48/-104		4.4	5.850e+15	6	6	80	12
31	25.01.2017	18:50:51	35.4378	26.4485	152/53/7	58/84/143	5.3	5.2	8.860e+16	22	61	62	11
32	27.01.2017	20:51:26	35.9847	28.6985	78/84/169	169/79/7	4.8	4.6	1.077e+16	10.3	19	58	16
33	06.02.2017	03:51:39	39.5453	26.1087	286/39/-116	138/56/-71	5.4	5.3	1.175e+17	11	6	87	12
34	06.02.2017	10:58:01	39.5248	26.0997	321/52/-72	113/42/-111	5.3	5.1	5.139e+16	13.9	6	73	13
35	06.02.2017	11:45:00	39.5313	26.0938	269/28/-82	80/62/-94	4.5	4.3	3.166e+15	12.6	8	77	6
36	07.02.2017	02:24:02	39.5235	26.1242	114/43/-89	292/47/-91	5.3	5.3	1.160e+17	12.7	8	94	15
37	07.02.2017	05:17:08	39.5365	26.1643	314/30/-64	106/64/-104	4.3	4.3	3.267e+15	5.4	7	64	15
38	08.02.2017	01:38:03	39.5310	26.1428	93/68/-110	317/29/-50	4.6	4.7	1.226e+16	10.4	6	72	11
39	10.02.2017	08:55:25	39.5182	26.1488	311/47/-106	154/46/-73	4.8	4.6	8449e+15	11.3	6	84	14
40	10.02.2017	10:27:31	39.7983	42.515	132/80/-179	42/89/-10	4.4	4.2	2.83e+15	5	8	59	13
41	12.02.2017	13:48:15	39.4997	26.1167	116/47/-93	301/43/-87	5.2	5.2	6.79e+16	13.3	10	58	14
42	15.02.2017	23:01:21	34.7897	24.9503	115/66/-36	221/58/-152	4.6	4.5	1.409e+16	6.9	16	60	11
43	16.02.2017	00:18:59	39.5205	26.0547	277/42/-110	123/51/-73	4.3	4.5	7.782e+15	13.7	11	80	17
44	25.02.2017	21:06:03	36.9255	36.0902	331/48/-117	188/48/-63	4.4	4.2	1.938e+15	9.5	8	50	15
45	28.02.2017	23:27:33	39.4943	26.0545	278/56/-97	112/35/-79	4.3	4.6	1.062e+16	11.2	7	60	14
46	02.03.2017	11:07:24	37.4860	38.5010	318/85/175	48/85/5	5.7	5.3	1.07e+17	14.6	6	67	11
47	03.03.2017	23:16:58	35.5832	25.8977	332/75/157	68/68/16	4.2	4.2	2.395e+15	8.2	7	45	10
48	15.03.2017	23:29:37	35.9412	27.5905	168/32/91	347/58/90	4.5	4.1	1.835e+15	14.9	11	45	8
49	13.04.2017	16:22:14	37.1490	28.6542	302/70/-73	80/26/-129	4.6	5.0	2.65e+16	5	5	55	6
50	21.04.2017	13:09:20	38.8003	29.0565	254/53/-96	85/37/-82	5.0	4.9	2.76e+16	7.2	4	59	13
51	21.04.2017	14:12:20	38.6513	27.6008	276/45/-138	154/62/-53	5.1	5.0	3.62e+16	13.1	4	79	15
52	11.05.2017	17:57:59	40.0655	40.7108	243/45/125	18/54/60	5.1	4.7	1.35e+16	5	9	70	15
53	17.05.2017	11:30:32	36.0635	27.4542	32/70/-62	156/34/-141	5.2	4.9	2.87e+16	7.7	7	57	10
54	27.05.2017	15:53:23	38.7390	27.8297	125/40/-96	312/50/-85	5.3	5.1	5.07e+16	11.8	6	71	6
55	28.05.2017	02:50:25	38.7200	27.7845	121/46/-92	303/44/-88	4.7	4.6	9.84e+15	9.4	4	68	10
56	28.05.2017	02:52:55	38.7425	27.7930	119/42/-94	304/48/-87	4.7	4.8	2.18e+16	10.9	4	67	12

57	28.05.2017	04:38:19	38.7375	27.7935	286/53/-123	153/48/-54	4.6	4.4	5.552e+15	10.5	5	72	9
58	28.05.2017	11:04:58	38.7272	27.7738	123/44/-91	305/46/-89	4.6	4.9	2.90e+16	8.7	4	67	13
59	12.06.2017	12:28:37	38.8468	26.3252	104/43/-100	299/47/-80	6.3	6.2	2.36e+18	14.4	10	80	10
60	17.06.2017	03:40:36	38.9183	26.2433	324/67/-13	60/78/-156	4.8	4.6	1.11e+16	12.7	9	93	7
61	17.06.2017	19:50:04	38.8508	26.4465	238/66/-157	138/69/-26	5.6	5.2	7.72e+16	12.7	7	74	10
62	22.06.2017	02:48:52	38.8265	26.4687	242/46/-143	124/64/-50	5.0	4.9	2.90e+16	15	8	91	10
63	03.07.2017	13:53:44	35.0673	26.6920	93/36/53	316/62/114	4.4	4.6	1.115e+16	10	7	53	8
64	15.07.2017	20:30:15	34.9133	25.4162	73/62/-2	164/88/-152	5.3	5.2	9.054e+16	10.7	6	68	8
65	20.07.2017	22:31:09	36.9693	27.4057	286/53/-72	78/40/-112	6.6	6.6	8.45e+18	7.1	6	70	15
66	20.07.2017	23:23:51	36.9580	27.3103	51/48/-114	265/47/-65	4.8	4.8	1.71e+16	12.2	10	52	12
67	21.07.2017	01:38:48	36.9320	27.5367	243/37/-133	113/64/-63	4.6	4.3	4.032e+15	11.7	7	71	8
68	21.07.2017	02:12:34	36.8833	27.3415	226/51/-142	110/62/-46	4.6	4.4	4.336e+15	9.5	10	64	7
69	21.07.2017	05:03:59	36.9198	27.5538	66/48/-82	234/43/-99	4.5	4.5	6.142e+15	10	6	64	6
70	21.07.2017	17:09:46	36.9465	27.2537	79/49/-83	249/41/-97	4.9	4.7	1.644e+16	6.7	11	54	9
71	22.07.2017	17:09:20	36.9402	27.2538	237/46/-130	107/56/-57	4.5	4.4	5.639e+15	8	10	48	7
72	22.07.2017	17:25:46	36.5810	26.7888	324/32/-169	225/84/19	4.5	4.6	1.06e+16	137	140	51	8
73	30.07.2017	17:51:18	37.0073	27.5977	275/61/-85	84/29/-100	4.5	4.5	7.282e+15	11.2	4	67	8
74	31.07.2017	21:29:09	34.1567	23.9122	241/39/-26	352/74/-126	5.3	5.2	9.262e+16	16.2	43	60	6
75	07.08.2017	05:18:47	37.0087	27.6098	90/41/-89	270/49/-91	4.6	4.6	8.526e+15	11.3	6	51	7
76	08.08.2017	01:46:19	36.9990	27.6447	291/69/-61	55/35/-141	4.3	4.3	3.769e+15	10.8	7	75	10
77	08.08.2017	07:42:19	37.0192	27.6017	56/48/-122	279/50/-59	5.2	5.2	6.76e+16	6	6	70	12
78	13.08.2017	11:16:51	37.1252	27.7187	288/57/-76	84/36/-110	4.8	4.9	2.573e+16	5.6	7	60	10
79	14.08.2017	02:43:48	37.1430	27.6867	110/52/-53	239/50/-128	4.8	4.7	1.44e+16	9.7	10	65	10
80	16.08.2017	15:53:29	36.5020	24.6958	40/42/78	236/48/100	4.7	4.8	2.31e+16	103.5	101	65	8
81	18.08.2017	12:47:31	36.9287	27.6220	98/33/-92	280/57/-89	4.5	4.3	3.443e+15	8	7	88	10
82	01.09.2017	16:48:33	36.0375	27.9943	337/56/138	94/56/42	5.1	4.9	2.386e+16	82	73	55	9
83	17.09.2017	14:29:33	39.2987	24.0040	129/71/-1	219/89/-161	4.5	4.4	4.769e+15	16.4	3	56	11
84	24.09.2017	16:57:16	36.9480	27.3167	70/47/-97	261/43/-81	4.4	4.4	5.46e+15	10.3	8	59	10
85	29.09.2017	16:08:39	37.0488	30.6487	321/71/-60	80/35/-146	4.6	4.5	8.257e+15	86.6	76	56	11
86	11.10.2017	22:49:42	39.1625	24.2627	224/79/-164	131/74/-12	5.0	5.0	3.36e+16	8.3	9	60	9
87	24.10.2017	09:36:23	36.9800	27.3993	284/35/-74	85/56/-101	4.5	4.6	1.062e+16	7.1	6	70	11

88	04.11.2017	21:54:08	36.7060	28.1540	114/20/40	346/77/105	4.5	4.4	4.858e+15	73	80	50	10
89	07.11.2017	02:40:31	36.3457	28.3988	303/56/171	38/82/33	4.7	4.5	7.48e+15	80.9	69	70	9
90	12.11.2017	18:18:16	34.8468	45.6265	125/44/60	343/52/116	7.2	7.1	5.91e+19	5	19	70	8
91	22.11.2017	20:22:51	37.1402	28.5863	291/48/-82	100/42/-99	5.0	4.8	1.908e+16	5.5	2	65	7
92	24.11.2017	21:49:14	37.1388	28.6148	100/46/-94	286/44/-86	5.1	5.2	8890e+16	7.0	4	60	7
93	25.12.2017	05:13:50	38.5750	26.7358	339/66/-12	73/79/-156	4.7	4.6	8.561e+15	17.5	8	84	13
94	21.02.2018	23:41:59	42.0215	25.0657	327/50/-41	87/60/-132	4.7	4.4	2.752e+15	2.6	15	52	6
95	12.03.2018	12:35:28	34.6175	23.8477	102/28/90	282/60/90	4.3	4.6	1.644e+16	18.3	7	50	6
96	07.04.2018	21:16:31	40.8617	31.6603	301/44/-141	181/64/-53	4.9	4.5	4.511e+15	6	6	60	10
97	10.04.2018	15:56:18	36.6938	26.1683	245/55/-112	101/40/-61	4.6	4.7	1.205e+16	15.7	11	60	10
98	13.04.2018	17:14:00	37.0823	31.9630	10/32/-66	163/61/-104	4.8	4.5	7.208e+15	10	16	66	7
99	13.04.2018	17:55:47	37.0738	31.9515	184/56/-94	11/34/-84	4.5	4.7	1.48e+16	11	19	70	8
100	21.04.2018	00:20:03	39.8840	23.7513	109/39/-86	284/51/-93	4.6	4.8	1.771e+16	5.0	9	81	12
101	24.04.2018	00:34:29	37.5217	38.5032	302/86/165	33/75/3	5.4	5.1	5.15e+16	13.2	10	60	10
102	02.05.2018	21:16:05	35.8167	28.3995	82/76/26	346/65/165	4.6	4.4	5.231e+15	85.7	65	55	12
103	03.05.2018	02:04:33	39.9797	26.9243	282/85/-96	154/3/-38	4.5	4.3	1.488e+15	12.7	15	87	5
104	16.05.2018	22:30:02	36.6092	23.0188	128/84/-167	36/77/-6	4.5	4.8	2.144e+16	5.5	19	54	6
105	14.06.2018	15:42:21	38.8683	43.5022	186/79/-25	281/65/-168	4.4	4.5	4.439e+15	5.0	10	60	6
106	23.06.2018	03:50:02	38.5402	44.3365	113/61/133	231/51/39	4.6	4.7	1.191e+16	5.0	9.0	65	10
107	21.07.2018	06:15:14	39.0508	44.0945	221/67/36	115/57/32	4.6	4.6	8.509e+15	5.0	12.0	74	10
108	23.07.2018	02:40:23	37.56	29.81	355/55/-107	203/39/-67	4.7	4.6	1.187e+16	5.0	11.0	65	19
109	26.07.2018	08:17:50	37.66	26.65	298/64/-52	57/45/-142	4.6	4.4	4.420e+15	10	14	77	6
110	04.08.2018	07:09:27	37.4877	36.2675	42/55/-29	150/67/-141	4.5	4.1	1.964e+15	1.2	7	61	9
111	19.08.2018	15:22:14	37.3223	36.3387	355/70/-105	213/25/-55	4.3	4.7	1.198e+16	127	6.0	56	4
112	10.09.2018	23:02:55	37.1797	30.6337	223/34/88	46/56/91	4.9	4.9	2.91e+16	105.7	107	68	10
113	12.09.2018	06:21:45	36.0988	31.1348	194/53/-20	297/74/-141	5.3	5.2	7.414e+16	18.5	40	53	7
114	26.09.2018	02:52:17	35.4265	26.5540	171/49/36	56/64/133	4.5	4.5	6.935e+15	72.9	62	65	5
115	02.10.2018	15:29:02	36.4322	27.7102	337/66/-155	236/67/-26	4.4	4.4	4.220e+15	5	5	66	7
116	29.10.2018	12:09:11	34.36	33.56	312/36/106	113/55/79	4.6	4.3	3.88e+15	3.4	15	60	8
117	30.10.2018	00:25:41	36.4622	28.7102	212/48/113	360/47/67	4.4	4.4	5.141e+15	5	7	55	11
118	27.11.2018	23:16:09	36.6617	25.7322	47/53/-94	233/37/-85	4.6	4.4	5.868e+15	7.9	7.0	50	9

119	16.12.2018	09:24:29	39.5880	24.3088	37/86/178	127/88/4	4.3	4.3	3.149e+15	15.4	3	83	9
120	20.12.2018	06:34:24	40.5995	28.9773	135/43/-83	305/47/-97	4.6	4.4	4.42e+15	7.3	8.0	82	17
121	24.01.2019	14:30:52	35.888	28.0675	344/54/176	77/86/36	5.3	5.2	7.25e+16	42	42	65	16
122	25.01.2019	20:20:33	38.5835	27.0987	259/72/-175	168/85/-18	4.4	4.2	2.39e+15	15	18	50	14
123	02.02.2019	12:20:37	37.2428	35.8272	324/87/161	55/71/3	4.6	4.4	4.42e+15	18	18	64	15
124	12.02.2019	17:14:29	40.5758	33.0137	94/83/-171	3/81/-7	4.8	4.6	1.00e+16	5	8	70	18
125	20.02.2019	18:23:27	39.6215	26.4348	336/71/-31	77/61/-159	5.4	5.0	4.12e+16	8	8	88	10
126	20.03.2019	06:34:26	37.4545	29.4317	143/51/-78	304/40/-105	5.6	5.5	1.89e+17	5	12	52	11
127	25.03.2019	11:29:25	38.7685	38.0625	238/79/-26	333/65/-168	4.7	4.5	7.35e+15	6.7	13	50	11
128	31.03.2019	11:30:15	37.4815	29.385	345/71/-99	193/21/-65	6.2	5.0	3.93e+16	5	8	62	15
129	01.04.2019	01:49:28	37.4882	29.3922	304/77/-102	165/18/-50	4.5	4.5	6.01e+15	6	13	60	14
130	04.04.2019	17:31:07	38.4072	39.1445	155/85/178	246/88/5	5.3	5.0	4.52e+16	5	8	77	7
131	15.04.2019	04:41:28	38.75	38.15	154/67/-151	52/63/-26	4.5	4.3	3.95e+15	5	6	71	11
132	29.04.2019	04:43:16	35.348	27.6907	324/71/-114	198/30/-39	5.0	4.9	2.57e+16	23	32	66	7
133	12.05.2019	22:24:08	39.3242	27.9253	248/80/-175	158/85/-10	4.5	4.4	4.94e+15	6	6	63	8
134	15.05.2019	16:53:47	31.7813	32.7763	140/79/169	232/79/12	4.5	5.0	3.78e+16	18	43	58	9
135	28.05.2019	05:27:46	36.96	27.64	292/56/-78	92/36/-107	4.6	4.5	8.14e+15	9	6	48	9
136	29.05.2019	19:42:25	39.26	39.89	241/49/-14	340/80/-138	4.5	4.2	2.97e+15	8	7	81	7
137	02.06.2019	13:08:47	40.7573	30.7637	96/21/-90	276/69/-90	4.2	4.3	3.86e+15	9	9	80	9
138	08.08.2019	08:39:07	38.022	26.853	274/27/-107	113/65/-81	5.0	4.6	8.44e+15	10	6	65	8
139	08.08.2019	11:25:30	37.921	29.601	277/36/-84	90/54/-94	5.7	5.7	4.21e+17	10	11	71	7
140	14.09.2019	06:00:29	40.733	32.9672	285/80/177	16/87/10	4.9	4.8	1.78e+16	5	7	68	7
141	14.09.2019	06:03:10	40.7632	32.9587	288/77/174	19/84/13	5.1	4.9	2.84e+16	5	7	71	11
142	24.09.2019	08:00:21	40.88	28.21	282/73/174	14/84/17	4.7	4.5	6.49e+15	10	4	77	16
143	26.09.2019	10:59:24	40.8832	28.211	27/62/40	276/55/145	5.7	5.6	3.45e+17	12.6	5	61	14
144	10.10.2019	23:55:57	39.4173	25.6478	253/87/-166	162/76/-3	4.5	4.3	3.47e+15	10.9	9	81	10
145	10.12.2019	20:14:02	39.4472	27.9345	145/81/-24	239/66/-170	5.0	4.6	1.19e+16	8	8	90	7
146	27.12.2019	07:02:24	38.3632	38.9967	178/87/118	273/28/5	5.1	4.9	2.85e+16	5	8	77	8



PVC SU BORULARININ İÇİNDEKİ SU SEVİYESİNİN MİKRO ŞERİT DİPOL ANTENLER İLE TESPİT EDİLMESİ

Ömer KASAR*

Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Mikro-Şerit Dipol Anten, Su Seviyesi Tespiti, PVC Boru, Doluluk Oranı.</i>	Bu çalışmada PVC su borularındaki su seviyesini tespit edebilecek bir RF güç iletim düzeneği oluşturulmuştur. Tasarlanan iki mikro şerit dipol anten, bir RF güç alıcı - vericisi olarak kullanılmıştır. Antenler $f_0 = 2,45$ GHz ISM bandında çalışmak üzere tasarlanmıştır. PVC su borularının içerisindeki suyun seviyesini, su ile görsel bir temas olmadan ve boruya fiziksel bir müdahalede bulunmadan tespit etmenin çok az yolu vardır. Bu çalışmada saf suyun elektrik geçirgenliğinin, havanınkinden yaklaşık 80 kat daha fazla olmasından yararlanarak boru içindeki suyun doluluk oranına göre iletim katsayısı belirlenmiştir. Boru içerisindeki su miktarı arttığında iletim katsayısı değişimi tespit edilmiştir. Benzetim programından ve ölçümden elde edilen iletim katsayısı değerlerine göre, boru kesitindeki suyun miktarı belirlenmiştir. PVC Boru içerisindeki su miktarının %0, %20, %50, %80 ve %100 değerleri için iletim katsayısının yaklaşık -20 dB ile -60 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Tasarlanan düzenek, boru içindeki su miktarının doğrusal karakteristikte tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

DETERMINING THE WATER LEVEL IN PVC WATER PIPES WITH MICRO-STRIP DIPOLE ANTENNAS

Keywords	Abstract
<i>Micro-Strip Dipol Antenna, Water Level Detection, PVC Pipe, Fill Rate.</i>	In this study, a power transmission setup was created to detect the water level in PVC water pipes. The two identical micro-strip dipole antennas designed were used as an RF transceiver system. The antennas were designed for the $f_0 = 2.45$ GHz ISM band. In this study, the transmission coefficients were determined according to the filling ratios of the water in the pipe by making use of the fact that the permittivity of distilled water is approximately 80 times higher than that of air. When the amount of water in the pipe increases, the changes of the transmission coefficient were determined. Thus, the water level in the pipe section can be determined according to the transmission coefficient values obtained from the simulation and measurement. It was observed that the transmission coefficient varies between -20 dB and -60 dB for 0%, 20%, 50%, 80% and 100% of the water in the PVC Pipe. The designed setup allows the water level in the pipe to be determined in a linear characteristic.

Alıntı / Cite

Kasar, Ö., (2020). PVC Su Borularının İçindeki Su Seviyesinin Mikro Şerit Dipol Antenler ile Tespit Edilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1165-1169.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Kasar, 0000-0003-1859-5236

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.11.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Radio frekanslarında (RF) frekanslarda suyun dielektrik geçirgenlik katsayısı havanınkinden yaklaşık 80 kat daha yüksektir. Bu yöntemden faydalanarak, PVC (Polyvinyl Chloride) su borularının içindeki su seviyesi arttıkça boru içindeki ortamın elektromanyetik özelliklerinin değişeceği söylenebilir (Callister, 2005). Su seviyesine bağlı olarak boru içindeki ortamın etkin dielektrik geçirgenliğinin artacağından boru kesiti boyunca elektromanyetik dalgaların iletimi değişiklik gösterecektir.

Yatay haldeki bir borunun içinden geçen su miktarını, boruya fiziksel bir müdahalede bulunmadan tespit etmenin pek az yolu vardır (Chahadih vd., 2015). Literatürdeki örnekler; alıcı verici şeklindeki sistemlerin daha etkin nasıl

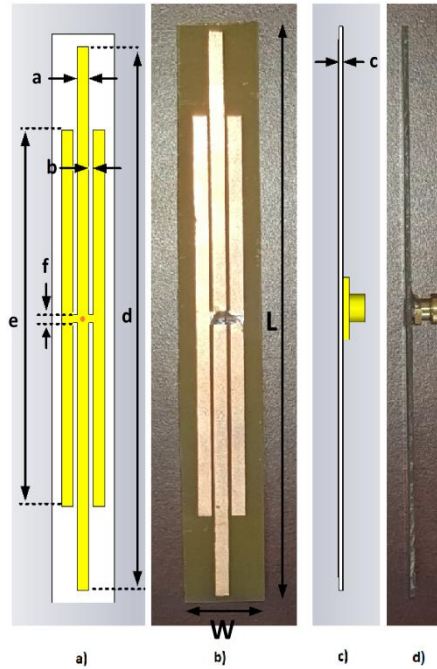
* İlgili yazar / Corresponding author: omerkasar@artvin.edu.tr, +90-505-400-33-77

kullanabileceği noktasındaki çalışmaların sürdüğünü göstermektedir (da Mota vd., 2018; de Lima Ávila vd., 2015; Zarifi vd., 2016). Bunlar gibi az sayıdaki çalışma, boru içerisindeki su miktarının tespiti için radyo frekansları, akustik çözümler ve sensör örneklerinden ve biyomedikal uygulamalarından bahsedilebilir (Chahadih vd., 2015; Chretiennot vd., 2012; da Mota vd., 2018; de Lima Ávila vd., 2015; GÖZEL vd., 2019; Tayyab vd., 2017; Zarifi vd., 2016; Zhang vd., 2019). Bu değişimden yola çıkılarak, birbiri ile eş iki mikro şerit dipol anten tasarlanmıştır (Balanis, 2005; Kasar, 2015). Antenler PVC borunun boyutları bilinen bir plastik su borusunun etrafına yatay yerleştirilerek dipol antenler yerleştirilerek borunun içindeki su miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Vektör Network Analizörü ile iki anten arasındaki borunun iletim parametresi (S_{21}) ölçülmüştür. Su miktarı değişimine göre iletimdeki değişim gözlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde dipol antenlerin tasarımı ve boyutları anlatılmıştır. Antenlerin PVC boru üzerinde uygulanmasından ve su yüzdesine göre borudaki suyun yüksekliğinin hesaplanmasından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, antenlerin geri dönüş kaybı ve düzeneğin iletim katsayısı verilmiştir. Boru içindeki su miktarının değişimine göre iletim katsayısı-frekans ve iletim katsayısı-doluluk analizleri yapılmıştır. Son bölümde de çalışmanın önemi ve özgünlüğü vurgulanmıştır.

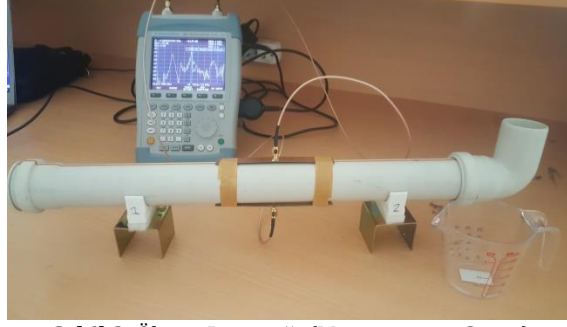
2. Dipol Anten Tasarımı ve Ölçüm Düzeneği (Dipol Antenna Design and Measurement Setup)

Dipol anten, mikro-şerit yapılı ve arka toprak (ground) kısmı bakır kaplı FR4 alttaş malzemesinden imal edilmiştir. FR4 malzemesinin elektriksel geçirgenliği $\epsilon_{FR4} = 4,3$ ve kayıp tanjantı $\tan \delta = 0,025$ 'dir. FR4 alttaş malzemesinin, üstündeki mikro şerit anten ve altındaki toprak kısmında $t = 0,035$ mm bakır kaplıdır. Mikro-şerit anten yapısı, biri ortada uzun ve ikisi de yanlarda biraz daha kısa olan üç şeritten oluşmaktadır. Antenin tam ortasında SMA konnektörün bağlandığı lehim deliği bulunmaktadır. Böylelikle gelen besleme ucu, boru ile temas etmeden antenin arkasından koaksiyel kabloya bağlanmıştır. $f_0 = 2,45$ GHz ISM bandında tasarlanan antenlerin yapısı ve boyutları Şekil 1'de verilmiştir. Antenin boyutları $a=3$ mm, $b=1$ mm, $c=1,5$ mm, $d=130$ mm, $e=90$ mm, $f=2$ mm, $L=140$ mm ve $W=18$ mm'dir.



Şekil 1. Benzetim ve gerçekleştirilen dipol antenlerin önden ve yandan görünüşü (Front and side view of simulated and manufactured dipole antennas)

Dipol antenler, dış çapı 50 mm olan PVC su borusunun etrafına, arada mesafe kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Düzenek bu yönüyle bir yakın alan probu görevi görmüşlerdir. Antenler ve ölçüm düzeneği CST MWS elektromanyetik benzetim programında tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen deney düzeneği de Rohde Schwarz FSH6 spektrum/network analizörü ile analiz edilmiştir. Tasarlanan antenler boruya paralel olacak şekilde biri üstünde biri de altında konumlandırılmıştır. Böylelikle su seviyesi arttıkça boru içerisindeki suya gönderilen elektromanyetik dalganın genlik değişiminin daha, doğrusal olarak tespit edileceği değerlendirilmiştir. Şekil 2'de deney düzeneğinin gerçekleştirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 2. Ölçüm Düzenegi (Measurement Setup)

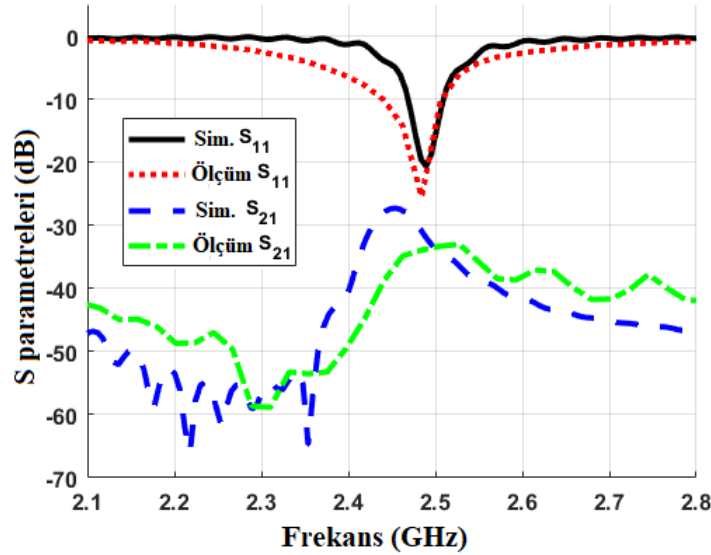
Borunun dış yarıçapı 25 mm ve iç yarıçapı da 23 mm'dir. PVC borunun dielektrik geçirgenlik katsayısı $\epsilon_{PVC} = 2,8$ 'dir. Benzetim programında tasarlarken, su yüksekliğinin, kesit alanı üzerinden hesaplanması için 'silindirik tank dolum problemine' başvurulmuştur (Weisstein, 2020). Suyun kesitinde kapladığı alanın hesaplaması (1)'e göre yapılmıştır.

$$A = R_w^2 \cos^{-1} \left(\frac{R_w - h}{R_w} \right) - (R_w - h) \sqrt{2R_w h - h^2} \quad (1)$$

burada, A borudaki suyun kesit alanını, R_w borunun iç yarıçapını ve h ise borudaki su yüksekliğini temsil etmektedir. Boru içindeki su miktarını ölçmede en belirleyici etken suyun dielektrik geçirgenlik katsayısıdır ($\epsilon_{su} = 79,4$). Su miktarı arttıkça boru içindeki hava ($\epsilon_{hava} = 1$), yerini suya bırakmıştır. Böylelikle seçilen bir frekansta iletim parametresinin değişimi gözlemlenmiştir

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Birbirine eş iki antenin karşılıklı konumlandırılmasıyla oluşan güç iletim ortamında, antenlerin geri dönüş kaybı (S_{11}) yaklaşık olarak 2,45 GHz frekansında -10 dB'nin altına düşmüştür. Aynı frekanslarda da iletim katsayısı (S_{21}) de en yüksek değeri almıştır. Şekil 3'te eş antenlerin geri dönüş kayıpları ve iletim katsayıları frekansa göre çizdirilmiştir.

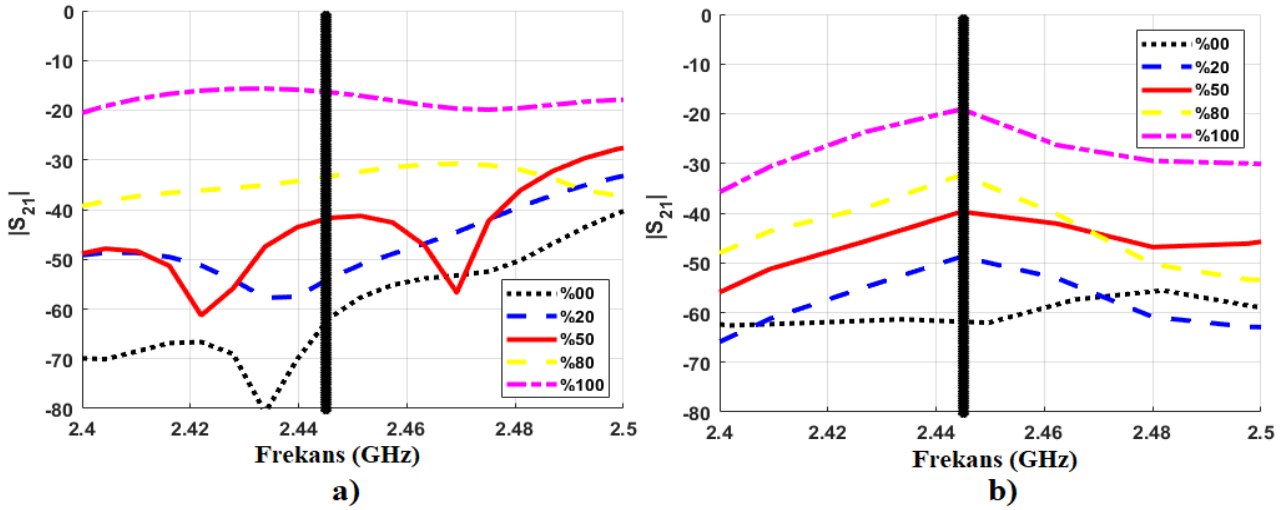


Şekil 3. Dipol antenlerin geri dönüş kaybı ve iletim parametreleri (Return Loss and Transmission coefficient of Dipol antennas)

Borunun içerisine farklı yüzdelerde su konulduğunda iletim katsayısındaki değişim gözlemlenmiştir. %0, %20, %50 %80 ve %100 değerleri için su seviyesi arttıkça iletim katsayısının arttığı görülmüştür. Şekil 4a'da benzetim programında elde edilen iletim karakteristiği görülmektedir. İletim katsayısı, farklı yüzdelerde frekans bandı boyunca doğrusal olmayan bir karakter sergilemektedir. Fakat seçilen yüzdelerde, grafikte (siyah dikey çizgi ile) işaretlenen bir f_0' frekansında, su miktarı arttıkça iletim katsayısının arttığı tespit edilmiştir.

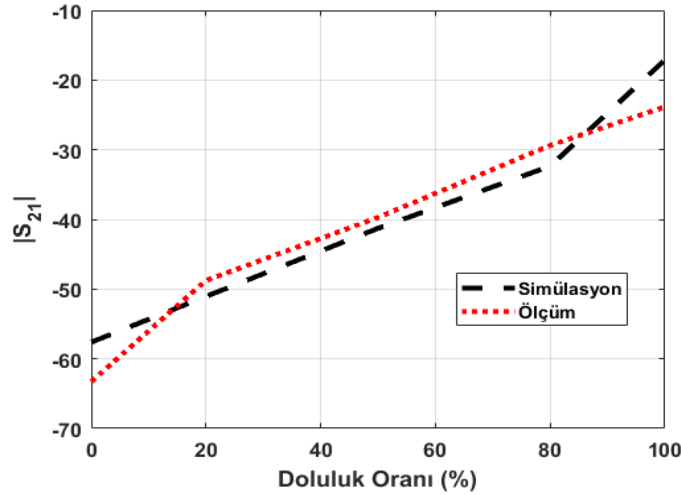
İletim katsayısının artışında; boru içindeki etkin dielektrik ortamın, anten rezonans frekansını değiştirmesi olarak yorumlanmaktadır. Elde edilen benzetim sonuçları ölçüm düzeneğinde test edilmiştir. Şekil 4b'de PVC boru

üzerindeki güç iletim katsayısının ölçüm sonuçları verilmiştir. Yine f_0' frekansında aynı seçilen yüzde doluluk oranları için aynı doğrusalık elde edilmiştir.



Şekil 4. PVC boru üzerindeki iletim katsayısının a) benzetim ve b) ölçüm sonuçları (Transmission Coefficient on PVC pipe a) simulation b) measurement)

İletim katsayısının, ölçüm ve benzetim programında doğrusalık gösterdiği noktalar aynı zamanda Şekil 5'in üzerinde işaretlenen noktalar $f_0' = f_{benzetim} = f_{ölçüm} = 2,445$ GHz frekansına aittir. Şekil 5'te borunun içindeki doluluk oranlarına göre iletim katsayısı (S_{21}) ölçüm ve benzetim olarak üst üste çizdirilmiştir. Belirlenen frekansta, ölçüm ve benzetimin örtüşmesi, yapılan işlemin başarısını göstermektedir.



Şekil 5. İletim Katsayısı - Doluluk Oranı (Transmission coefficient vs. Fill Ratio)

4. Değerlendirme (Conclusion)

Bu çalışmada PVC su borularındaki su seviyesini tespit edebilecek bir iletim düzeneği oluşturulmuştur. Tasarlanan iki eş mikro şerit dipol anten, bir RF alıcı – verici sistem olarak kullanılmıştır. Antenler $f_0 = 2,45$ GHz ISM bandında tasarlanmıştır.

Suyun elektrik geçirgenliğinin, havanınkinden yaklaşık 80 kat daha fazla olmasından yararlanarak boru içindeki suyun doluluk oranına göre iletim katsayısı belirlenmiştir. Su seviyesi arttığında iletim katsayısı değişimi tespit edilmiştir. Böylelikle benzetim programından ve ölçümden elde edilen iletim katsayısı değerlerine göre boru kesitindeki suyun miktarı belirlenebilmiştir.

Tasarlanan düzenek, su ile görsel bir temas olmadan boru içindeki su miktarının tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Önerilen anten tasarımı ve deney düzeneği, farklı tiplerde ve kalınlıklardaki dielektrik borular için geliştirilebilir. Bu çalışma, RF devreler ile plastik borulardaki su miktarını ölçebilecek yöntemlerin geliştirmeye açık olduğunu göstermektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Artvin Çoruh Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (AÇÜ-BAP) tarafından 2019.F14.02.01 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory, analysis and design* (3rd ed.). New York, USA, Wiley.
- Callister, W. D. (2005). *Fundamentals of materials science and engineering* (2 ed. Vol. 471660817), Wiley London.
- Chahadih, A., Cresson, P. Y., Hamouda, Z., Gu, S., Mismar, C., Lasri, T. (2015). Microwave/microfluidic sensor fabricated on a flexible kapton substrate for complex permittivity characterization of liquids. *Sensors and Actuators A: Physical*, 229, 128-135.
- Chretiennot, T., Dubuc, D., Grenier, K. (2012). A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(2), 972-978.
- da Mota, F. R. M., Pagano, D. J., Stasiak, M. E. J. I. S. J. (2018). Water Volume Fraction Estimation in Two-Phase Flow Based on Electrical Capacitance Tomometry. *18*(16), 6822-6835.
- de Lima Ávila, H. E., Pagano, D. J., de Sousa, F. R. J. F. M., Instrumentation. (2015). Improving the performance of an RF resonant cavity water-cut meter using an impedance matching network. *43*, 14-22.
- GÖZEL, M., Kasar, Ö., Kahrıman, M. (2019). 868 MHz UHF bandında H-şeklinde katlanmış implant mikroşerit dipol anten tasarımı. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(3), 797-806.
- Kasar, O. (2015). *Numerical and Experimental Analysis on Real Impedance Matching Techniques for Rectangular and Circular Shaped Patch Antennas*. Master of Science, Suleyman Demirel University, Isparta.
- Tayyab, M., Sharawi, M. S., Al-Sarkhi, A. J. I. S. J. (2017). A radio frequency sensor array for dielectric constant estimation of multiphase oil flow in pipelines. *17*(18), 5900-5907.
- Weisstein, E. W. (2020). Quarter-Tank Problem. Erişim Tarihi 19.04.2020), adres <https://mathworld.wolfram.com/Quarter-TankProblem.html>
- Zarifi, M. H., Rahimi, M., Daneshmand, M., Thundat, T. (2016). Microwave ring resonator-based non-contact interface sensor for oil sands applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 224, 632-639.
- Zhang, K., Amineh, R. K., Dong, Z., Nadler, D. (2019). *A Microwave Sensor Array for Water Quality Testing*. Paper presented at the 2019 IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON).



DONATILI ŞEV YAKININA OTURAN ŞERİT TEMEL DAVRANIŞININ SAYISAL İNCELEMESİ

Buse EMİRLER*

Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Şev,
Şerit Temel,
Taşıma Gücü,
Güvenlik Katsayısı,
Sayısal Analiz.

Öz

Bu çalışmada, şev yakınına oturan şerit temeller ile ilgili taşıma gücü ve stabilite analizleri yapılmıştır. Örnek deneysel model doğrultusunda, şevli kum zemin yüzeyine yerleştirilen $B=0.07m$ genişliğinde bir şerit temel, şev tepesinden farklı mesafe oranlarında düşey yüke maruz bırakılmıştır. Analizlerde donatı kullanımının da taşıma gücüne ve güvenlik katsayısına olan etkileri incelenmiştir. Sayısal analizler, sonlu eleman yöntemine dayalı PLAXIS 3D bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Taşıma gücünün belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan deneylerle karşılaştırılmış ve üç boyutlu sayısal analizin taşıma gücünü tahminindeki başarısı araştırılmıştır. Temelin şev tepesinden uzaklığının ve donatı kullanımının güvenlik katsayısına olan etkisi ise parametrik olarak çalışılmıştır. Deney ve sayısal analizden elde edilen taşıma gücü sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmüş ve sonrasında yapılan parametrik çalışmada, temelin şev tepesine olan uzaklığının artması ve donatı kullanılması ile güvenlik katsayısının arttığı belirlenmiştir.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR OF STRIP FOOTING CONSTRUCTED NEAR REINFORCED SLOPE

Keywords

Slope,
Strip Footing,
Bearing Capacity,
Safety Factor,
Numerical Analysis.

Abstract

In this study, bearing capacity and stability analyses were performed about the strip footings constructed near the slope. According to the example of experimental model presented, a strip footing in the width of $B=0.07m$ placed on the slope which consists of sandy soil was subjected to an axial load at different distances from the slope top. In the analysis, the effects of the use of reinforcement on bearing capacity and safety factor were also examined. PLAXIS 3D software based on the finite element method was employed for numerical analyses. The results obtained from the numerical analysis conducted to determine the bearing capacity were compared with the experiments in the literature, and the success of the three-dimensional numerical analysis in predicting the bearing capacity was investigated. The effect of the distance of the footing from the top of the slope and the use of reinforcement on the safety factor were studied, parametrically. It is observed that the finite element results provide a highly fit with the experimental data obtained from the literature and in the parametric study performed afterwards, it is determined that the safety factor increases with the increase of the distance ratio of the footing to the top of the slope and with using reinforcement.

Alıntı / Cite

Emirler, B., (2020). Donatılı Şev Yakınına Oturan Şerit Temel Davranışının Sayısal İncelemesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1170-1179.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Emirler, 0000-0002-0234-7177

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.08.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	31.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: bemirler@cu.edu.tr, +90-322-613-7311

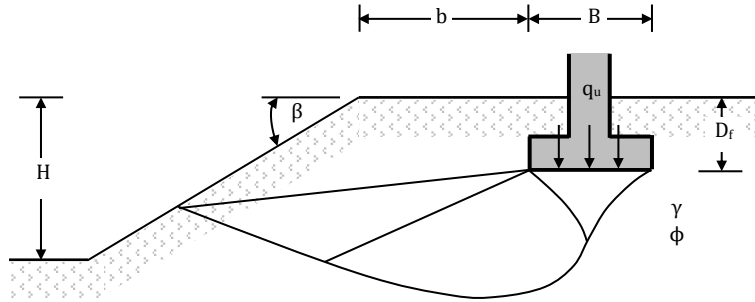
1. Giriş (Introduction)

Temeller, yapısal yükleri güvenli olarak zemine aktaran yapı elemanlarıdır. Yapısal yüklerin büyüklüğü, yönü, yer altı koşulları vb. faktörler inşa edilecek temelin yüzeysel ya da derin olması durumunu etkiler. Yüzeysel temellerin yük aktarımı esnasında, zeminde hem basınç hem de kayma gerilmeleri oluşur. Bu gerilmelerin büyüklükleri çoğunlukla temel taban basıncına ve temelin boyutlarına bağlıdır. Taban basıncının yeteri kadar büyük veya temelin yeteri kadar küçük olması, kayma gerilmelerinin zeminin kayma dayanımını aşmasına ve bu durumun taşıma gücü yenilmesi ile sonuçlanmasına sebep olabilir (Coduto, 2001). Temel zemininin problemlili olması halinde en genel çözüm, derin temel seçilerek yapı temelinin tasarlanmasıdır. Fakat bu çözümün pahalı olması ve inşaat teknolojisindeki hızlı ilerleme, problemlili zeminlerde yeni çözümler elde edilmesini zorunlu hale getirmiştir. Uygulamada sıklıkla kullanılan geoteknik çözümlerden biri, donatılı zemin uygulamasıdır. Zeminin taşıma gücünü arttırmada ve oturumları azaltmada geogridler sıklıkla kullanılmaktadır (Keskin, 2009).

Literatürde taşıma gücünü belirlemek için birçok yöntem mevcuttur (Prandtl, 1921; Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1951; Balla, 1962; Brinch Hansen, 1970; Vesic, 1975). Terzaghi (1943) ve diğer taşıma gücü formülleri, düz (yatay) zemin yüzeyine oturan bir temel üzerine etkiyen düşey yükleri dikkate alır. Ancak temellerin bir şev üzerine veya yakınına inşa edilmesi gerektiği durumlar da vardır. Yaklaşım dolguları üzerine oturan köprü ayakları, elektrik direkleri ve bazı bina yapıları örnek olarak verilebilir. Bir yapı temelinin şevli bir zemin üzerine inşa edildiği durumlarda taşıma gücü, eğimli olmayan zemine oranla şevin eğimine ve temelin konumuna göre önemli mertebelerde azalabilmektedir (Keskin, 2009). Şev yakınına oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü ile ilgili ilk teorik çalışma Meyerhof (1957) tarafından gerçekleştirilmiştir. H yüksekliğinde bir şevin yakınına oturan B genişliğinde bir şerit temel, şev tepesinden b kadar mesafeye yerleştirilmiştir (Şekil 1). Bu tür zeminler üzerindeki şerit temellerin taşıma gücü, kohezyonsuz zeminler ($c=0$) için Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$q_u = 0.5\gamma BN_{\gamma q} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de; q_u taşıma gücü, γ zeminin birim hacim ağırlığı, B temel genişliği, $N_{\gamma q}$ ise taşıma gücü katsayısıdır. Bu katsayı; temel derinliği (D_f), temel genişliği (B), zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve şev tepesinden uzaklık (b) parametrelerine bağlı olarak belirlenmektedir (Das, 2011).



Şekil 1. Şev yakınına oturan yüzeysel temel (Shallow foundation constructed near slope) (Das, 2011)

Temelin şev üzerine inşa edildiği durumlarda, taşıma gücünün artırılması için uygulanabilecek çözümlerden biri, temelin şev tepesine yeterince uzak bir mesafeye yerleştirilerek, şevin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin azaltılmasıdır. Ekonomik olmayan bu çözüm yerine kullanılabilir yöntem ise taşıma kapasitesinin geogrid donatı kullanılarak artırılması olabilir.

Donatısız ve donatılı şevlere oturan şerit temellerle ilgili teorik ve deneysel çalışmalar literatürde mevcuttur (Graham vd., 1988; Gemperline, 1988; Saran vd., 1989; Selvadurai ve Gnanendran, 1989; Shields vd., 1990; Huang ve Tatsuoka, 1994; Huang vd., 1994; Lee ve Manjunath, 2000; Yoo, 2001; Bathurst vd., 2003; Blatz ve Bathurst, 2003; Keskin ve Laman, 2014). Ancak sayısal modellemeler ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Keskin vd. (2007) şevli kum zemine oturan şerit temellerin davranışını PLAXIS 2D bilgisayar programı ve Meyerhof yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Şev açısının 30° ve 35° olması durumunda temelin şev tepesinden $5B$, 40° olması durumunda ise $6B$ uzaklığa yerleştirilmesiyle şevsiz bir ortama benzer davranışın elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca Meyerhof yönteminin, sayısal analizden elde edilen sonuçlara kıyasla daha düşük değerler verdiğini belirtmişlerdir. Shiao ve Watson (2008) şev yakınına oturan yüzeysel bir temelin taşıma gücünü FLAC3D bilgisayar programını kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada, temelin şev tepesinden uzaklık oranı D/B 'nin 4'ten büyük olması durumunda şev etkisinin ortadan kalktığını görmüşlerdir. Ayrıca temel uzunluğunun artmasıyla taşıma gücünün azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Pınarlık vd. (2017) geotekstil kullanılan ve kullanılmayan şevlerin davranışını Slide2 bilgisayar programı ile araştırmışlardır. Şeve dolgu yapıldığında, güvenlik katsayısının arttığını ve bu artışın dolgulu şevin güçlendirilmesiyle daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Ayrıca kohezyon ve içsel sürtünme açısının artmasıyla güvenlik katsayısının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Keskin ve Akgül (2020) kumlu şevlerin yakınına oturan şerit temellerin taşıma gücü davranışını PLAXIS 2D bilgisayar programı ile araştırmışlardır. Analizlerde; şev açısı, zemin sıklığı, temel genişliği ve temelin şev tepesine olan mesafesinin taşıma gücüne etkisini incelemişlerdir. Şev açısının artmasının taşıma gücünü azalttığını; zemin sıklığı, temel genişliği ve temelin şev tepesine uzaklığının artmasının ise taşıma gücünü artırdığını belirlemişlerdir. Şev açısının artmasıyla güvenlik katsayısının azaldığını, zemin sıklığının artmasıyla ise güvenlik katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca analizler sonucunda elde edilen göçme mekanizmalarının şev yüzeyinde oluştuğunu ve temeli şev tepesinden uzaklaştırdıkça mekanizma üzerinde şev etkisinin ortadan kalktığını görmüşlerdir.

Bu çalışmada, şevli kum zemin yakınına oturan şerit temeller ile ilgili taşıma gücü ve stabilite analizleri yapılmıştır. Analizlerde sonlu eleman yöntemine dayalı PLAXIS 3D bilgisayar programı kullanılmıştır. Zemin yüzeyinin düz (0°) ve 30° eğimli olduğu durumda yapılan analizlerde, temelin şev tepesine olan mesafe oranının (b/B), donatı kullanımının (N=1) ve donatı uzunluğunun (L_R) taşıma gücü ve güvenlik katsayısına olan etkileri incelenmiştir. Taşıma gücünün belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan deneylerle karşılaştırılmış ve sayısal analizin taşıma gücünü tahminindeki başarısı araştırılmıştır. Temelin şev tepesinden uzaklığının ve donatı kullanımının güvenlik katsayısına olan etkileri ise parametrik olarak çalışılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmada, şevli kum zemine oturan şerit temelin sayısal analizi sonlu eleman yöntemine dayalı PLAXIS 3D bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde çalışma ortamının geometrik modeli, Keskin (2009) tarafından yapılan çalışma ışığında, üç boyutlu ve ele alınan şerit temel problemine uygun olarak oluşturulmuştur. Geometrik modelin genişliği 1.140m, uzunluğu 0.475m ve yüksekliği ise 0.450m'dir. Analizler, zemin yüzeyinin düz (0°) ve şev açısının $\beta=30^\circ$ olduğu durumlar için yapılmıştır. Zemin modeli olarak Mohr-Coulomb (MC) tercih edilmiştir. Geoteknik mühendisliği problemlerinin analizinde zeminlerin davranışı; az sayıda model parametresine ihtiyaç duyulması, geoteknik mühendislerinin gerekli model parametrelerine aşına olmaları, içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi basit fiziksel özellikler kullanılarak göçme kriteri tanımlama olanağının bulunması ve zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilecek temel zemin mekaniği laboratuvar deneyleriyle bu parametrelerin kolaylıkla elde edilebiliyor olması gibi nedenler ile yaygın olarak Mohr-Coulomb malzeme modeli ile araştırılabilmektedir (Emirler vd., 2019). MC model için zemin parametreleri, deneyler sonucunda elde edilmiştir (Tablo 1). Deneylerden elde edilen kohezyon değeri her ne kadar $c=0$ olsa da, program, kohezyon (c) değerinin 0 alınması durumunda analizlerde formülasyondan dolayı bazı sıkıntılar doğabileceğini belirtmiş ve kohezyonun 0.2kN/m^2 'den büyük alınmasını önermiştir (Plaxis 3D Material Models Manual, 2019). Bu sebeple analizlerde kohezyon değeri $c=0.4\text{kN/m}^2$ olarak alınmıştır. Şerit temel, plate olarak modellenmiştir. Eleman parametreleri olarak çelik malzemenin özellikleri kullanılmış ve girdi parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Temel; 0.07m genişlikte, 0.465m uzunlukta ve 0.02m yükseklikte modellenmiştir. Donatılı analizlerde ise donatı olarak geogrid yapısal elemanı kullanılmış ve eksenel rijitlik değeri $EA=1100\text{kN/m}^2$ alınmıştır (Keskin, 2009). Donatı ile zemin arasındaki etkileşim ara yüz elemanı vasıtasıyla dikkate alınmış ve literatüre uygun olarak mukavemet azaltma faktörü $R_{\text{inter}}=0.90$ seçilmiştir (Faizi vd., 2013).

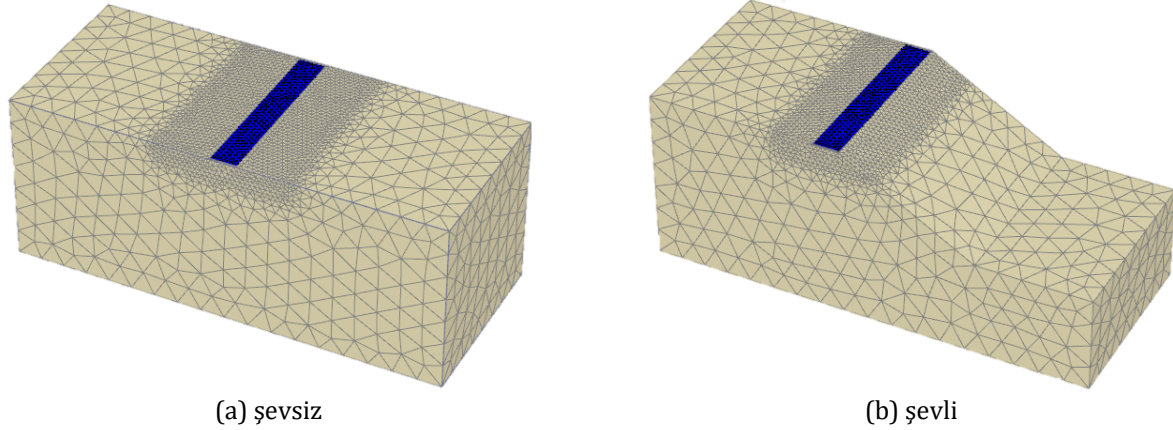
Tablo 1. Kum zemin için parametreler (Parameters for sandy soil)

PARAMETRE	DEĞER
Malzeme modeli	MC
Drenaj türü	Drenajlı
Kuru birim hacim ağırlık, γ_{unsat} (kN/m ³)	17.0
Elastisite modülü, E (kN/m ²)	28000
Poisson oranı, ν	0.25
Kohezyon, c (kN/m ²)	0.4
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	41.8
Dilatasyon açısı, Ψ (°)	11.8

Tablo 2. Şerit temel için parametreler (Parameters for strip footing)

PARAMETRE	DEĞER
Kalınlık, d (m)	0.02
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	77.0
Elastisite modülü, E (kN/m ²)	2×10^8
Poisson oranı, ν	0.3

PLAXIS 3D'de sonlu elemana ayırma işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmekte, ayrıca istenilen bölgelerde ağ sıkılaştırması seçeneği sunulmaktadır. Bu çalışmada, sonlu eleman ağı orta sıklıkta (medium) oluşturulmuş ve temel etrafında sıkılaştırma işlemi yapılmıştır. Donatının kullanılmadığı şevsiz durumda yapılan analizlerde çalışma ortamı, 32193 dört yüzlü (tetrahedral) eleman ve 48122 düğüm noktasından oluşmuştur. Şevli durumda ise 21560 eleman ve 32960 düğüm noktası meydana gelmiştir (Şekil 2). Taşıma gücü analizlerinde hesaplama türü "Plastic", güvenlik katsayısı analizleri için ise "Safety" seçilmiştir. Ayrıca şevsiz durum için başlangıç koşulları "Ko procedure" ile, şevli durumda ise "Gravity loading" ile oluşturulmuştur.

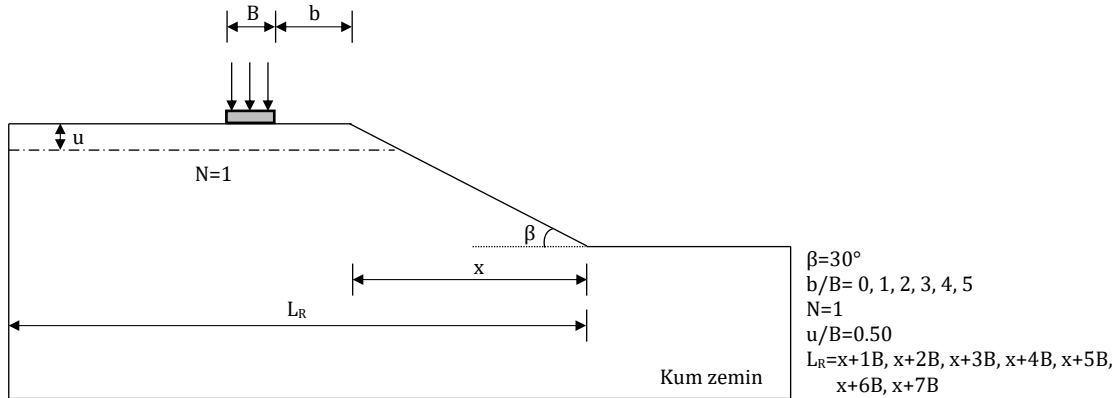


(a) şevsiz

(b) şevli

Şekil 2. Sonlu eleman ağı (Finite element mesh)

Modelde araştırılan parametrelere ilişkin görsel Şekil 3'te verilmiştir. Çalışma boyunca; donatısız durumdaki şev yakınına oturan $B=0.07\text{m}$ genişliğinde bir şerit temelde, $b/B=0, 1, 2, 3, 4$ ve 5 olmak üzere altı farklı mesafe oranının taşıma gücünde ve güvenlik katsayısında meydana getirdiği değişim incelenmiştir. Donatılı analizler ise $b/B=1$ olmak üzere sabit bir mesafe oranında yapılmış ve donatı uzunluğunun $L_R=x+1B, x+2B, x+3B, x+4B, x+5B, x+6B$ ve $x+7B$ olmasının taşıma gücü ve güvenlik katsayısına etkileri araştırılmıştır.



Şekil 3. Model geometrisi (Model geometry)

3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Sayısal modelleme yapılan bu çalışmada; üç boyutlu analizin başarısı, Keskin (2009) tarafından yapılan deneyler kullanılarak araştırılmıştır. Şerit temelin şev tepesinden uzaklığının ve donatı kullanımının taşıma gücü ve güvenlik katsayısına olan etkileri iki ayrı başlık halinde sunulmuştur.

3.1. Taşıma Gücü (Bearing Capacity)

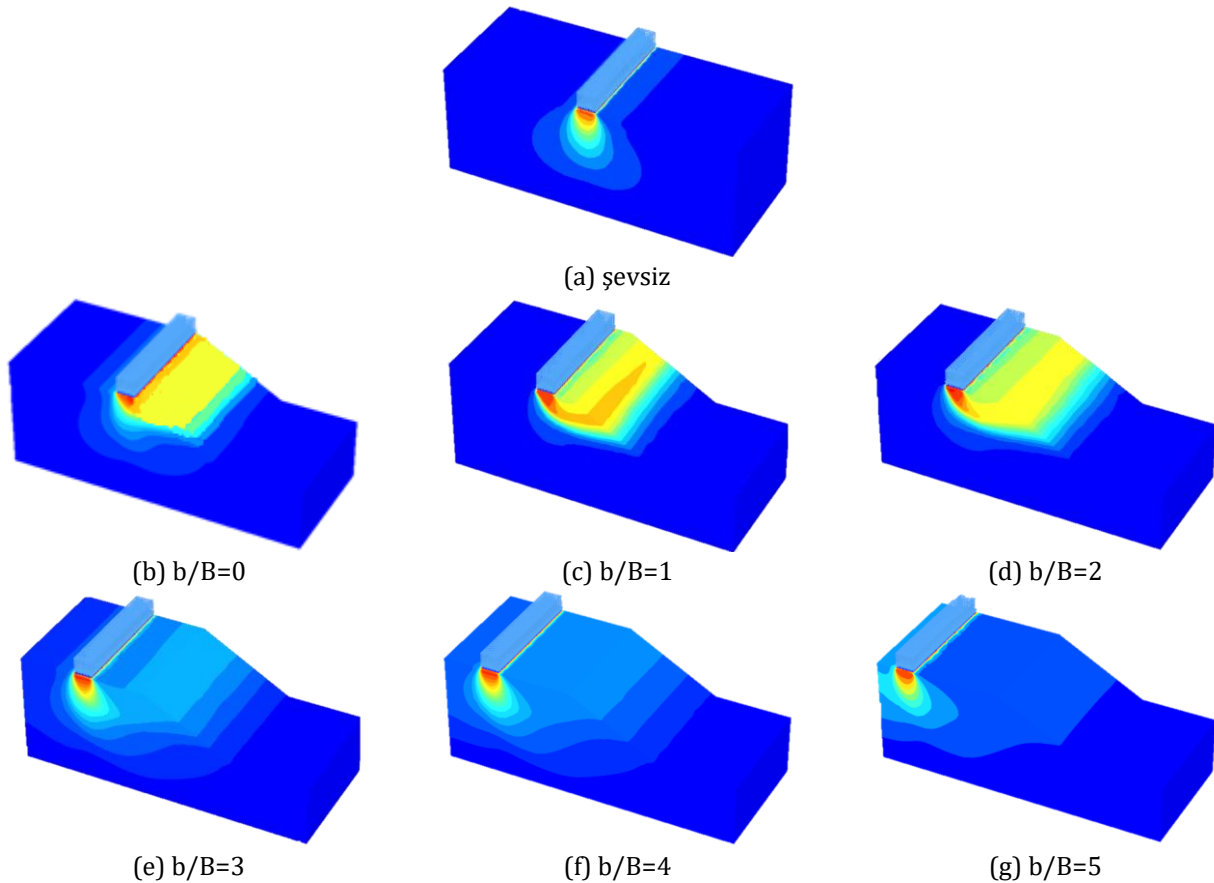
Analizlerde; $B=0.07\text{m}$ genişliğinde şerit temel, şev açısı $\beta=30^\circ$ olan bir şevin tepesine farklı mesafe oranlarında ($b/B=0, 1, 2, 3, 4$ ve 5) yerleştirilerek modellenmiştir. Ayrıca zemin yüzeyinin düz olduğu durum için ($\beta=0^\circ$) yapılan analizle, şevin taşıma gücünde ve göçme mekanizmasında yarattığı değişimin incelenmesi sağlanmıştır. Tablo 3'te şevsiz ve şevli durum için yapılan analizlere ait sonuçlar verilmiştir. Elde edilen sonuçların deneylerle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Deney ve sayısal analiz arasında maksimum %2.8, minimum ise %0.08 fark elde edilmiştir ve bu farklar kabul edilebilir değerlerdedir. MC zemin modelinin az sayıda model parametresi içermesine rağmen modellemedeki başarısı, geoteknik problemlerin davranış tahmininde bu modelin kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Temelin şev tepesinden uzaklaşmasıyla taşıma gücü önemli oranda artmıştır.

Şevsiz durumdaki taşıma gücü değeri 127.95 kN/m^2 iken, temelin şev tepesine olan mesafe oranının $b/B=1$ olduğu durumda taşıma gücünün 31.55 kN/m^2 'ye düştüğü ve yaklaşık 4 kat azaldığı görülmüştür. $b/B=5$ olduğunda elde edilen taşıma gücü değeri ise şevsiz durumda elde edilen taşıma gücü değeriyle neredeyse aynı çıkmıştır. Bu durumda $b/B=5$ mesafe oranında, temelin taşıma gücü üzerinde şevin bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Tablo 3. Donatısız durum için taşıma gücü analiz sonuçları (Bearing capacity analysis results for unreinforced case)

β (°)	b/B (-)	DENEY (kN/m^2)	SAYISAL ANALİZ (kN/m^2)
0	-	130.40	127.95
30	0	31.50	31.55
30	1	56.70	56.27
30	2	72.86	74.80
30	3	90.27	90.20
30	4	109.11	110.55
30	5	124.40	127.88

Araştırılan parametrenin göçme mekanizmasına olan etkisi incelendiğinde şevsiz durumda ($\beta=0^\circ$) temel altında düzgün bir deplasman dağılımı elde edilmiştir. Ancak şevli durumda ($\beta=30^\circ$) şev tepesine yakın mesafe oranlarında göçme mekanizmasının şevden etkilendiği, $b/B=3$ 'ten sonra ise düz bir zemine oturan şerit temelin göçme mekanizmasına benzer göçme mekanizmalarının elde edilmeye başlandığı görülmüştür (Şekil 4). Analiz sonuçlarından temelin şev tepesine olan mesafesinin, taşıma gücünü etkileyen önemli bir parametre olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 4. Taşıma gücü analizi için b/B 'nin göçme mekanizmasına etkisi (Effect of b/B on failure mechanism for bearing capacity analysis)

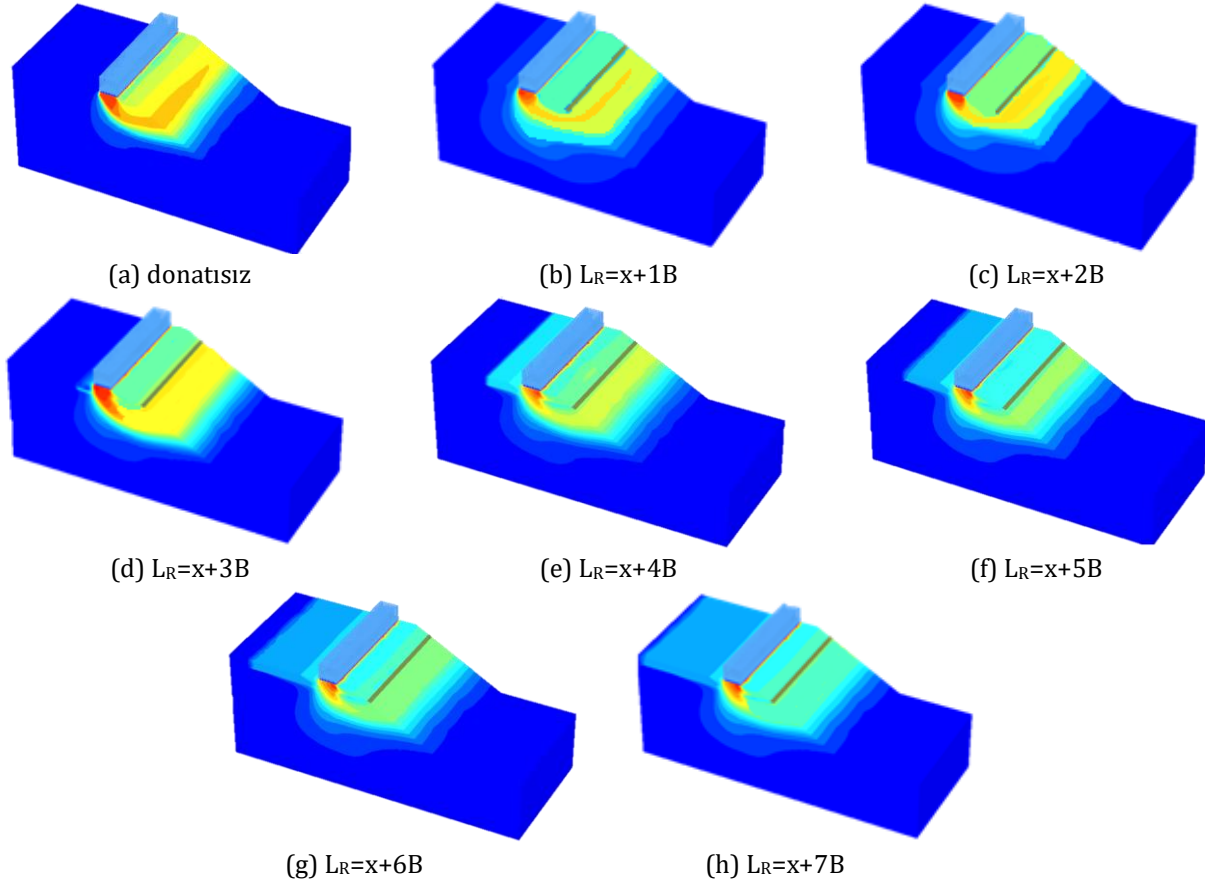
Donatının taşıma gücüne etkisini incelemek için $b/B=1$ mesafe oranında farklı donatı uzunlukları ($L_R=x+1B, x+2B, x+3B, x+4B, x+5B, x+6B$ ve $x+7B$) için analizler yapılmıştır. Analizlerde donatı sayısı $N=1$ ve donatı derinliği oranı $u/B=0.50$ olarak sabit tutulmuştur. Parametrenin hem taşıma gücü hem de göçme mekanizmasına olan etkileri incelenmiştir. Temelin taşıma gücüne ait sonuçlar Tablo 4'te verilmiş ve sayısal analiz sonuçlarının deneylerle uyum içinde olduğu görülmüştür. Donatı uzunluğunun artmasıyla temelin taşıma gücü önemli oranda artmış,

ancak $L_R=x+5B$ 'den sonra bu artış miktarı oldukça azalmıştır. Donatı uzunluğunun $L_R=x+1B$ olduğu durumda taşıma gücü değeri 58.50kN/m^2 iken, $L_R=x+7B$ 'de bu değer 104.94kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Bu iki donatı uzunluğundaki taşıma güçleri kıyaslandığında meydana gelen artış yaklaşık %80, $L_R=x+5B$ ile $L_R=x+7B$ arasında ise yaklaşık %6 civarında olmuştur. Ayrıca donatısız durumda elde edilen taşıma gücü değerinin 56.27kN/m^2 , donatılı durumda elde edilen maksimum değer ise 104.94kN/m^2 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, tek donatının dahi taşıma gücünü yaklaşık 2 kat artırdığı belirlenmiştir.

Tablo 4. Donatılı durum için taşıma gücü analiz sonuçları (Bearing capacity analysis results for reinforced case)

L_R (m)	DENEY (kN/m^2)	SAYISAL ANALİZ (kN/m^2)
Donatısız	56.70	56.27
x+1B	60.81	58.50
x+2B	70.06	72.11
x+3B	83.68	84.50
x+4B	92.12	92.10
x+5B	101.66	98.67
x+6B	105.19	102.80
x+7B	108.33	104.94

Araştırılan parametrenin göçme mekanizmasına olan etkisi incelendiğinde donatısız durumda temel altında meydana gelen deplasman yoğunluğunun fazla olduğu ve şevden etkilendiği görülmüştür. Donatı kullanılmasıyla birlikte yoğunluğun hafiflediği ve donatı uzunluğunun $L_R=x+5B$ olmasıyla birlikte şevin, göçme mekanizmasında oluşturduğu etkinin azaldığı belirlenmiştir. (Şekil 5). $L_R=x+5B$ ile $x+7B$ için elde edilen göçme mekanizmalarının benzer olduğu ve ekonomi de düşünüldüğünde, $x+5B$ donatı uzunluğunun optimum bir değer olarak kabul edilebileceği söylenebilir. Analiz sonuçları ile donatı kullanımının ve donatı uzunluğunun, taşıma gücü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Taşıma gücü analizi için L_R 'nin göçme mekanizmasına etkisi (Effect of L_R on failure mechanism for bearing capacity analysis)

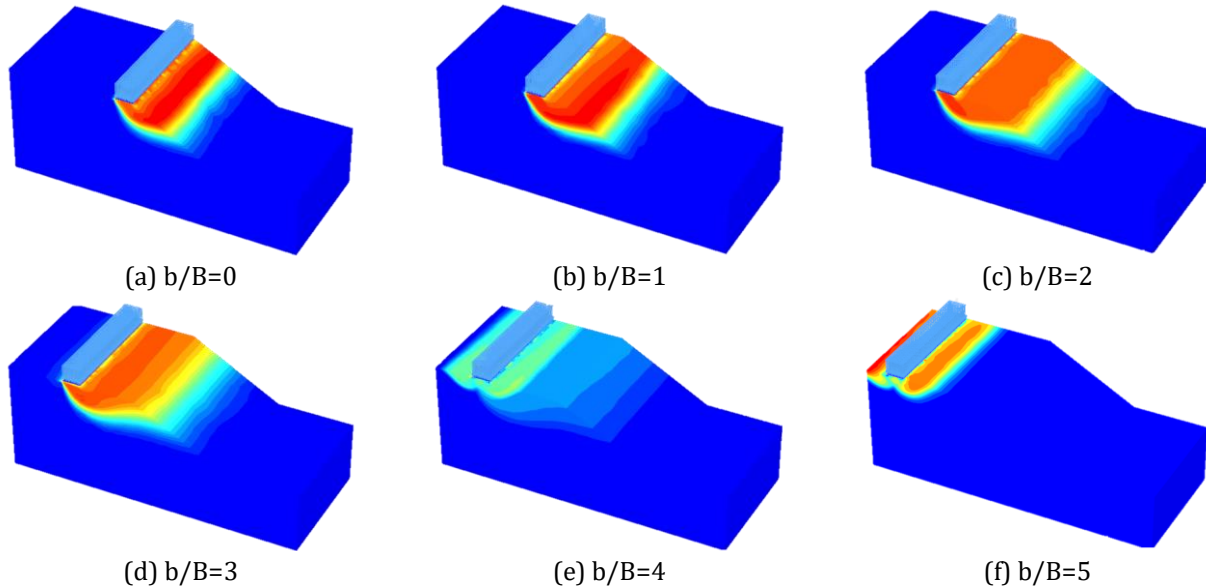
3.2. Güvenlik Katsayısı (Safety Factor)

Analizlerde ele alınan model üzerinde güvenlik katsayısının tespiti, "Safety" hesaplama türü kullanılarak yapılmıştır. Her bir analiz için temel üzerinde 30 kN/m^2 'lik yüzey yükü (surface load) olduğu varsayılmıştır. Tablo 5'te şev tepesinden farklı mesafe oranları için elde edilen güvenlik katsayıları verilmiştir. Sonuçlara göre temelin şev tepesinden daha uzak bir noktaya konumlandırılmasının, şev stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve mesafe oranının artmasıyla güvenlik katsayısının arttığı görülmüştür. Elde edilen minimum ve maksimum güvenlik katsayıları arasında yaklaşık 1.5 katlık bir fark olduğu belirlenmiştir. Ancak bu fark, $b/B=3$ ile $b/B=5$ arasında yaklaşık %6 civarında küçük bir değerdir. Dolayısıyla temelin $b/B=3$ mesafe oranından daha uzak bölgelere yerleştirilmesinin, stabiliteye önemli bir katkısının olmadığı anlaşılmıştır.

Tablo 5. Donatısız durum için güvenlik katsayısı analiz sonuçları (Safety factor analysis results for unreinforced case)

b/B	GÜVENLİK KATSAYISI
0	1.05
1	1.25
2	1.38
3	1.49
4	1.54
5	1.58

Elde edilen bu sayısal sonuçlar göçme mekanizmalarıyla da desteklenmiştir. $b/B=4$ ve 5 mesafe oranları için şevin göçme mekanizmasına herhangi bir etkisi olmamıştır. Üstelik $b/B=5$ mesafe oranı için modelde sınır etkisinin ortaya çıktığı ve bu durumun mekanizmada anlamsız bir yoğunluğa sebep olduğu görülmüştür (Şekil 6).



Şekil 6. Güvenlik katsayısı analizi için b/B 'nin göçme mekanizmasına etkisi (Effect of b/B on failure mechanism for safety factor analysis)

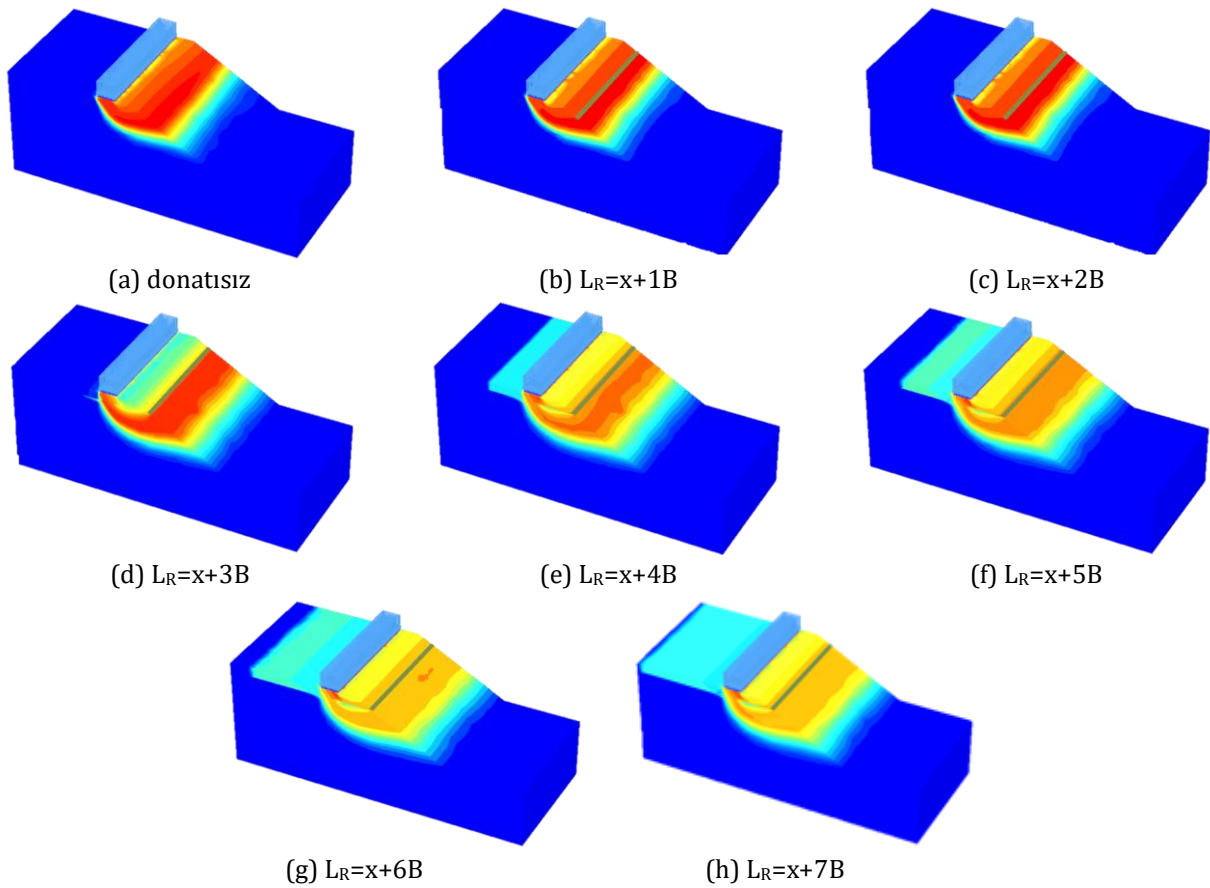
Donatı kullanımının güvenlik katsayısına etkisi de araştırılmıştır. Şev tepesine mesafe oranının $b/B=1$ olduğu, 30 kN/m^2 'lik yüke maruz temel modelinde; $L_R=x+1B$, $x+2B$, $x+3B$, $x+4B$, $x+5B$, $x+6B$ ve $x+7B$ donatı uzunlukları için analizler yapılmış ve sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur. Donatısız durumda elde edilen güvenlik katsayısı 1.25 iken, donatı uzunluğunun $x+1B$ olduğu durumda güvenlik katsayısı 1.27 olarak elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile bu uzunluğun stabilite üzerinde pek bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. $L_R=x+7B$ donatı uzunluğunda ise güvenlik katsayısının 1.48 olduğu tespit edilmiştir. $L_R=x+5B$ ve $x+7B$ donatı uzunlukları arasında güvenlik katsayısındaki artış yaklaşık %2 gibi az bir düzeyde meydana gelmiş, ekonomi de göz önüne alındığında $L_R=x+5B$ uzunluğunda donatı kullanımının daha makul olduğu belirlenmiştir.

Araştırılan parametrenin göçme mekanizmasına olan etkisi incelendiğinde, donatısız durumda temel altında meydana gelen deplasman yoğunluğunun oldukça fazla olduğu görülmüştür. Donatı kullanılmasıyla birlikte yoğunluğun azalmaya başladığı, $L_R=x+5B$ ve sonrasında ise bu azalmanın maksimum düzeyde olduğu ve neredeyse

sabitlendiği belirlenmiştir (Şekil 7). Analiz sonuçları ile donatı kullanımı ve donatı uzunluğu parametrelerinin, güvenlik katsayısı üzerinde de önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6. Donatılı durum için güvenlik katsayısı analiz sonuçları (Safety factor analysis results for reinforced case)

L_R	GÜVENLİK KATSAYISI
Donatısız	1.25
x+1B	1.27
x+2B	1.34
x+3B	1.39
x+4B	1.41
x+5B	1.45
x+6B	1.47
x+7B	1.48



Şekil 7. Güvenlik katsayısı analizi için L_R 'nin göçme mekanizmasına etkisi (Effect of L_R on failure mechanism for safety factor analysis)

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, şevli kum zemin yakınına oturan şerit temeller ile ilgili taşıma gücü ve stabilite analizleri yapılmıştır. Taşıma gücünün belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan deneylerle karşılaştırılmış, temelin şev tepesine uzaklığının ve donatı kullanımının güvenlik katsayısına olan etkileri ise parametrik olarak çalışılmıştır. Araştırılan parametrelerin taşıma gücü, güvenlik katsayısı ve göçme mekanizmasına olan etkileri, sonlu eleman yöntemine dayalı üç boyutlu sayısal analiz programı ile başarılı bir şekilde yansıtılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Temelin şev tepesine olan mesafe oranı arttıkça taşıma gücü artmış ve mesafe 5B olduğunda elde edilen taşıma gücü değeri, zemin yüzeyinin düz olduğu durumdakiyle yakın çıkmıştır. Göçme mekanizmaları incelendiğinde, $b/B=3$ 'e kadar olan mesafe oranlarında şevin temel davranışı üzerinde oldukça etkili olduğu, ancak bu değerden

sonra elde edilen göçme mekanizmalarının düz yüzeyli bir zemin durumunda elde edilen göçme mekanizmasına benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca donatı kullanımının temel taşıma gücünü önemli oranda artırdığı ve göçme mekanizmaları incelendiğinde, şevde meydana gelen deplasman yoğunluğunu sönümlendiği belirlenmiştir.

- Şevli zemin durumu için yapılan stabilite analizlerinde, temel şev tepesinden uzaklaşmasıyla güvenlik katsayısı artmış ve bu artış yaklaşık 1.5 kat civarında olmuştur. Göçme mekanizmaları incelendiğinde, $b/B=4$ ve 5 mesafe oranlarında şevin mekanizma üzerinde etkisinin kalmadığı görülmüştür. Ayrıca donatı kullanımının stabiliteyi olumlu yönde etkilediği ve güvenlik katsayısını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Buna karşın, $L_R=X+5B$ 'den daha uzun donatı kullanımının ise stabiliteye önemli bir katkısının olmadığı göçme mekanizmalarından da açıkça anlaşılmıştır.

Bu çalışma, literatürdeki deneyler ile modeli doğrulamaya yönelik olduğundan elde edilen sayısal sonuçlar gerçek boyutlu değerleri yansıtamayabilir. Bu sebeple gerçek projeler/modellemeler için ölçek ve boyut etkisinin göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Ayrıca mevcut deneysel çalışmada şerit temel malzemesi çelik olduğundan, sayısal çalışmada da bu malzemeye ait özellikler tanımlanmıştır. Ancak uygulamada, betonarme malzemenin bu seviyede bir rijit davranış yerine daha esnek bir davranış sergileyeceği unutulmamalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Balla, A., 1962. Bearing Capacity of Foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 88(5), 13-34.
- Bathurst, R.J., Blatz, J.A., Burger, M.H., 2003. Performance of Instrumented Large-Scale Unreinforced and Reinforced Embankments Loaded by a Strip Footing to Failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1067-1083.
- Blatz, J.A., Bathurst, R.J., 2003. Limit Equilibrium Analysis of Large-Scale Reinforced and Unreinforced Embankments Loaded by a Strip Footing. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1084-1092.
- Brinch Hansen, J., 1970. A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", *The Danish Geotechnical Institute*, 28, 5-11.
- Coduto, D.P., 2001. *Foundation Design: Principles and Practices*. Prentice Hall, New Jersey.
- Das, B.M., 2011. *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning, Connecticut.
- Emirler, B., Tolun, M., Yıldız, A., 2019. Eğik Çekme Yüğü Etkisindeki Tekil Kazığın Üç Boyutlu Sayısal Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 219-229.
- Faizi, K., Armaghani, D.J., Kassim, A., Lonbani, M., 2013. Evaluation of Geotextiles on Embankment Displacement under Seismic Load. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18(C), 439-449.
- Gemperline, M.C., 1988. Centrifugal Modeling of Shallow Foundations. *ASCE Spring Convention*, Nashville, 45-70.
- Graham, J., Andrews, M., Shields, D.H., 1988. Stress Characteristics for Shallow Footings in Cohesionless Slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(2), 238-249.
- Huang, C.C., Tatsuoka, F., 1994. Stability Analysis for Footings on Reinforced Sand Slopes. *Soils and Foundations*, 34(3), 21-37.
- Huang, C.C., Tatsuoka, F., Sato, Y., 1994. Failure Mechanisms of Reinforced Sand Slopes Loaded with a Footing. *Soils and Foundations*, 34(2), 27-40.
- Keskin, M.S., 2009. Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi. *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Keskin, M.S., Akgül, F., 2020. Şev Yakınına Oturan Yüzeysel Temellerin Taşıma Kapasitesinin Sayısal Analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(1), 363-372.
- Keskin, M.S., Laman, M., 2014. Experimental and Numerical Studies of Strip Footings on Geogrid-Reinforced Sand Slope. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(3), 1607-1619.
- Keskin, M.S., Laman, M., Aslan, F., 2007. Kumlu Şevlere Oturan Şerit Temellerin Analizi. *Yapı Zemin*, 159-164.
- Lee, K.M., Manjunath, V.R., 2000. Experimental and Numerical Studies of Geosynthetic-Reinforced Sand Slopes Loaded with a Footing. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 828-842.
- Meyerhof, G.G., 1951. The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. *Géotechnique*, 2(4), 301-332.
- Meyerhof, G.G., 1957. The Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Slopes. *4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, 384-386.
- Pınarlık, M., Öztürk Kardoğan, P.S., Kılıç Demircan, R., 2017. Şev Stabilesine Zemin Özelliklerinin Etkisinin Limit Denge Yöntemi ile İrdelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 675-684.
- PLAXIS 3D, 2019. *Material Models Manual*. R.B.J. Brinkgreve, L.M. Zampich, and N. Ragi Manoj, Eds., Delft.
- Prandtl, L., 1921. Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1(1), 15-20. (in German)
- Saran, S., Sud, V.K., Handa, S.C., 1989. Bearing Capacity of Footings Adjacent to Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(4), 553-573.
- Selvadurai, A.P.S., Gnanendran, C.T., 1989. An Experimental Study of a Footing Located on a Sloped Fill: Influence of a Soil Reinforcement Layer. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(3), 467-473.
- Shiau, J.S., Watson, J.F., 2008. 3D Bearing Capacity of Shallow Foundations Located near Deep Excavation Sites. *International Conference on Deep Excavations (ICDE 2008)*, Singapore, 1-8.
- Shields, D., Chandler, N., Garnier, J., 1990. Bearing Capacity of Foundations in Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*,

116(3), 528-537.

Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York.

Vesic, A.S., 1975. Bearing Capacity of Shallow Foundations. Foundation Engineering Handbook. H.F. Winterkorn and H.Y. Fang, Eds., Van Nostrand Reinhold, New York, 121-147.

Yoo, C., 2001. Laboratory Investigation of Bearing Capacity Behavior of Strip Footing on Geogrid-Reinforced Sand Slope. Geotextiles and Geomembranes, 19(5), 279-298.



SIVI NİTROJEN İLE SUNİ DOLU YAPIMI VE ŞİMDİYE KADAR YAPILAN YAPAY DOLULARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Gökalp YILMAZ¹, Mehmet Eren UZ^{2*}, Mohammad DAWOOD SIZAR², Meryem Dilara KOP²

¹İnotim Mühendislik Makine San. ve Tic. A.Ş., AR-GE Sorumlusu, 09100, Aydın, Türkiye

² Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 09100, Aydın, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Dolu,</i> <i>Sıvı Nitrojen,</i> <i>Yapay Dolu,</i> <i>Dolu Darbe Testi.</i>	Dolu, tanım olarak, donmuş katı bir şekilde yeryüzüne düşen su parçacıklarıdır. Boyutları 20 cm'ye kadar çıkabilmektedir. Bu sert kütleler yeryüzüne 80 ile 110 km/s lik hızlarla çarpmakta, ancak bu çarpışmaya rağmen kırılmamaktadırlar. Doluların bu kütle ve hızlarda verdikleri zarar ise bir hayli fazladır. Örneğin; İspanya'nın Alicante şehrinde 2019'un Ağustos ayında gerçekleşen dolu fırtınası 3 milyon euro değerinde zarar vermiştir. Araba kaportalarına, uçak gövdelerine, evlerin çatılarına, solar panellere, rüzgâr türbinlerine verdikleri zarar her yıl milyonlarca lira kayba neden olmaktadır. Tüm bunlara rağmen dolu ile ilgili çalışmalar, dolunun simüle edilememesi ve dolayısıyla dolunun verdiği hasarın da tam olarak simüle edilememesinden dolayı tam başarıya ulaştığı söylenememektedir. Bu çalışmada daha önceden yapılmamış ve literatüre geçmemiş olan sıvı nitrojen ve su ile suni dolu yapılmaktadır. Daha önceden dolu hasar testlerinde kullanılan çelik toplar, indentörler, normal buz küreleri gibi uygulamaların gerçeğe yakın sonuçlar vermediği ve dolu karakteristiği gösteremediği saptanmıştır. Bu eksiklik, yaptığımız "suni dolunun" gerçekte çok yakın karakterde olduğunun ispatı ile giderilmiştir. İşbu ispat dolunun kırılmaması, atış testlerinde benzer sonuçlar vermesi, suni dolunun yoğunluğu gibi parametrelerin gerçek doluya yakın olması sonucunda pekiştirilmiştir.

PRODUCTION OF ARTIFICIAL HAILSTONE WITH LIQUID NITROGEN AND COMPARISONS WITH OTHER ARTIFICIAL HAILSTONES UP TO NOW

Keywords	Abstract
<i>Hailstone,</i> <i>Liquid Nitrogen,</i> <i>Artificial Hailstone,</i> <i>Hailstone Impact Test.</i>	Hailstones are, by definition, particles of water that fall into the Earth in a frozen solid. Its dimensions can be up to 20 cm. These hard masses strike the Earth at speeds of 80 to 110 km/h, but they do not break despite this collision. The damage caused by hail at this mass and speed is a great deal. For example, a hailstorm in August 2019 in Alicante, Spain, caused 3 million euros worth of damage. The damage they do to car bodywork, aircraft bodies, roofs of houses, solar panels, and wind turbines causes millions of Turkish liras of losses each year. In spite of all this, the studies related to hail cannot be said to have achieved full success due to the inability to simulate hailstones and therefore the damage caused by hailstones can not be fully simulated. In this study, artificial hailstones are made with liquid nitrogen and water, which have not been done before and have not been passed to the literature. It was determined that applications such as steel balls, indentors, normal ice spheres used in hail damage tests did not produce real results and did not show hail characteristics. This deficiency has been eliminated by the proof that the "artificial hailstones" we have made is very close to reality. This proof is confirmed as a result of not breaking the hailstones, giving similar results in firing tests, and parameters such as the density of the artificial hailstones being close to the actual hailstones.

* İlgili yazar / Corresponding author: mehmet.uz@adu.edu.tr, +90 (256) 213 75 03 - 3736

Alıntı / Cite

Yılmaz, G., Uz, M.E., Sizar, M.D., Kop, M.D., (2020). Sıvı Nitrojen ile Suni Dolu Yapımı ve Şimdiye Kadar Yapılan Yapay Dolularla Karşılaştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1180-1189.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Yılmaz, 0000-0003-2183-586x
M.E. Uz, 0000-0002-4466-5536
M.D. Sizar, 0000-0003-3165-2346
M.D. Kop, 0000-0001-6428-5744

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.01.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	23.09.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Dolu hasarı her yıl milyonlarca lira kayba neden olmaktadır. Dolu yağışının hasarının önlenememesi geçmişten günümüze hep bir sorun olmuştur. İnsanları maddi ve manevi yönden kötü yönde etkileyen bu doğal afetin verdiği zararı azaltma amacı ile üniversiteler, özel laboratuvarlar, araba firmaları gibi kurumlar çalışmalar yapmaktadırlar. Yapılan çalışmalarda en önemli sorun ise gerçekçi bir dolu atışının elde edilememesidir. Bu sorunu, çözmek için ise önce doluyu simüle etmek gerekmektedir. Doluyu simüle edebilmek için farklı cisimlerle çalışmalar yapılmıştır. En çok kullanılan yöntem kalıp kullanılarak demineralize suyun dondurulması ile elde edilen yöntemdir. Plastik toplar (Flüerer vd. 2008), çelik toplar, normal buz küreleri gibi kullanılan cisimler doluyu simüle edememektedir. Doğal dolunun içten dışa donması, doğal dolunun embriyo adı verilen çekirdeğinde toz, tuz gibi malzemelerin bulunması doluyu oluşturan ve farklı kılan özelliklerdendir. Oysaki üstte sıralanan dolu yapım yöntemlerinde bunların hiçbiri yoktur. Araştırmalarımız sonucunda bulunan sıvı nitrojen kullanarak dolu üretme yöntemi, literatürüne girecek ve dolu testlerine ışık tutacak cinstendir. Literatürde bulunmaması da projenin özgünlüğü ve gelişebilirliği açısından önemli niteliktedir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bugüne kadar birçok farklı araştırmacı tarafından yapay dolu yapımı denenmiştir. Örnek olarak ilk olarak çelik ya da başka indentör kullanılmıştır. (Johnson ve Schaffnit, 1973; Nomura vd., 1984; Vreede vd., 1995; Fleming vd., 1997; Shi vd., 1997; McCormick vd., 1998; USS, 2005; Flüeler vd., 2008). (Geoffrey Pyke vd., 1942) su-talaş karışımından buz yapmıştır. Swift (2013) pamuk kullanarak yapay dolu çalışmaları yapmıştır. Daha sonra Uz vd.(2017) % 12 PVA (Polivinil Asetat) içeren dolularda deneyler yapmışlardır fakat bu yöntemlerin hiçbiri doğal dolunun oluşum sürecini ve özelliklerini göstermede yetersiz kalmaktadır fakat sıvı nitrojen kullanılarak yapılan dolu doğal dolunun oluşum sürecindeki gibi katmanlı oluşumu ve dolunun kırılmama özelliğini göstermektedir. Bu yöntem sayesinde literatürdeki bu eksiklik giderilmiş olacak ve daha sonra yapılacak çalışmalar için yol gösterici bir çalışma olacaktır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Doğal dolu Kümülonimbus adı verilen kümülüs bulutlarının dikey olarak gelişerek büyümesiyle oluşan konvektif fırtına bulutlarındaki 0 ile -40 derece arasındaki sıcaklık farkından dolayı ani bir şekilde katman katman donar ve kristal bir yapıya sahip olur. Dolunun bu kristal yapısı doluya elastiklik katar ve güçlü olmasını sağlar. Lauri (1960) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda dolunun merkezinde (çekirdeğinde) tuz, toz ve diğer partiküllerin de bulunduğu anlaşılmıştır.

“Dolu ile ilgili bu güne kadar yapılan çalışmalar, dolunun yapısı, oluşumu hakkında bizlere ışık tutmaktadır. Knight ve Knight (2016), dolu embriyoları, içerisinde hava kabarcıkları bulundurduğundan opak ve kristal yapıda görüldüğünü belirtmektedirler. Çapı 5mm’den fazla olan buz yağışları Dunlop (2008) tarafından dolu olarak tanımlanmıştır. Ortalama dolu yoğunluğunun 0.91 g/cm³ olduğu bildirilmiştir (Brimelow vd. 2002; Crenshaw ve Koontz 2002). Dolu boyutunun, dolu dayanımına etkisi Sain ve Narasimhan (2011)’ın yaptığı çalışmada belirtilmiştir. Knight ve Knight’ın belirttiği embriyolarda donmuş olan hava kabarcıklarından dolayı embriyoların opak olması, Nelson’un (1983) dolu katmanları arasındaki opaklık farkının, kümülönimbus bulutlarındaki sıcaklık ve nem değişkenliği olduğunu ve opak katmanların su buharının ani donmasıyla oluştuğunu söylemiştir.

Swift(2013), pamuk kullanarak yaptığı çalışmalarda, pamuklu buz küresinin dayanımının normal buzdan fazla olduğunu göstermiştir. Gerektiğinden fazla dayanımdaki pamuklu dolu, homojen olmama, yüzey sürtünmesi farklılığı gibi problemleri bulunmaktadır.

Uz vd.’nin(2017) çalışmasında Dolu’nun karakteristik özelliklerinden şu şekilde belirtmiştir”İlk olarak, dolu tanesinin büyük çoğunluğu buzdan oluşmalıdır. İkinci olarak, dolu tanesinin nitelikleri tanenin her yerinde aynı

olmalıdır. Üçüncü olarak, üretilen dolu taneleri kullanılırken çarpışan yüzeyler arasında gerçekçi bir sürtünmenin simülasyonu için doğal dolu tanelerinde görülen yüzeyde erime davranışı görülmelidir. Son ve en önemli karakteristik özellik ise üretilen dolu tanelerinin hedeflenen limit hızda isabet ettikten sonra bütünlüğünü korumalarıdır. Bu kriterlerin seçimi arkasındaki sebepler şunlardır: İlk kriter şu an kullanılan çelik ve plastik toplar gibi buzdan tamamen farklı davranan maddelerin kullanımından doğan belirsizlikleri kısıtlamaktadır. İkinci kriter, panel üzerinde oluşacak çukurun dolu tanesinin isabet ettiği yöne veya tanenin oryantasyonuna bağlı olarak değişmemesini sağlamaktadır. Üçüncü kriterin sebebi ise doğal dolu tanelerinin yeryüzüne düşerken sıcaklıktan dolayı yüzeyin eriyip ve böylelikle yüzey sürtünmesinin çok küçük bir değere çekilmesidir. Son olarak, en kuvvetli dolu taneleri bütünlüklerini limit hızda çarpışmadan sonra korumaktadır. Küçük parçalara ayrılan dolu taneleri parçalanma esnasında enerjiyi dağıtıp çelik panele aktarılan enerjiyi azaltacaktır.”

Bu bulgular nazarında gerçekçi bir dolu üretmek amacı ile önce yoğunluğunun sağlanması gerekmektedir. Daha sonra katman katman oluşması bu sayede yüksek dayanım gerekmektedir. Sonraki aşama ise çekirdek ve embriyo oluşumu sağlanmalı, gerçek doluya çok yakın olması sağlanmalıdır. Sıvı nitrojenin soğukluğu sayesinde bu dondurma işleminin adım adım gerçekleştirilebileceği öngörülmüş ve sıvı nitrojenle suni dolu üretme yöntemi yazar tarafından bulunmuş ve geliştirilmiştir.

3.1. Literatürdeki Yapay Dolu Üretimi (Artificial Hailstone Production In Literature)

Dünya’da yapılan dolu testlerinde birden fazla yöntem denenmiştir. En çok kullanılan yöntem demineralize su ile kalıplarda dondurma işlemidir, bunun yanında %12 PVA (Polivinil Asetat) karışımı, pamuk karışımı, polyamide, çelik toplar, microfiber içerikli, talaş karışımı kullanılmıştır. Dolu atış testlerinde kullanılan bu yapay dolularla yapılmıştır. Bazı araştırmacılar çelik ya da başka bir indentörü havadan serbest bırakarak denemeler yapmışlardır. [Johnson ve Schaffnit, 1973; Nomura vd., 1984; Vreede vd., 1995; Fleming vd., 1997; Shi vd., 1997; McCormick vd., 1998; USS, 2005; Flüeler vd., 2008.]. Geoffrey Pyke vd., 1942; su-talaş karışımından buz yapmış, dayanımını arttırmış ve adına Pykrete demiştir. Swift (2013) pamuk kullanımının dolunun sünekliliğini arttırdığını söylemiştir. Daha sonra Uz vd.(2017) % 12 PVA (Polivinil Asetat) içeren dolularda deneyler yapmışlardır. Bu çalışmalarda su ile karıştırılıp dondurulan buzların ortak özelliği ise dayanımlarının artmış olmasıdır. Bugüne kadar yapay dolu üretimi için kullanılan yöntemler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yapay Dolu Üretiminde Kullanılan Yöntemler (Methods used in the production of artificial hail)

Araştırmacılar	Kullandıkları Materyal
[Johnson ve Schaffnit, 1973; Nomura vd., 1984; Vreede vd., 1995; Fleming vd., 1997; Shi vd., 1997; McCormick vd., 1998; USS, 2005; Flüeler vd., 2008.]	Çelik ya da başka bir indentör
Geoffrey Pyke	Su-talaş karışımından buz
Swift (2013)	Pamuklu Dolu
Uz vd.(2017)	PVA’lı Dolu

Doluyu yapı ve teknik özellikleriyle simüle etmek için denenilen bu yöntemler, dolunun bazı karakteristik özelliklerini gösterse de hepsini gösteremediği açıktır. Yapay doluyu üretmek büyük bir sorun olmuş ve olmaya da devam etmektedir. Günümüze kadar milyonlarca lira harcanarak yapılan dolu darbe testleri, bu kullanılan malzemelerle yapılmış ve güvenilir bir sonuca ulaşılamamıştır.

3.2. Yapay Dolu Üretimi İçin Yeni Bir Yöntem: Sıvı Nitrojenli Dolu (A New Method For Artificial Hailstone Production: Hailstone With Liquid Nitrogen)

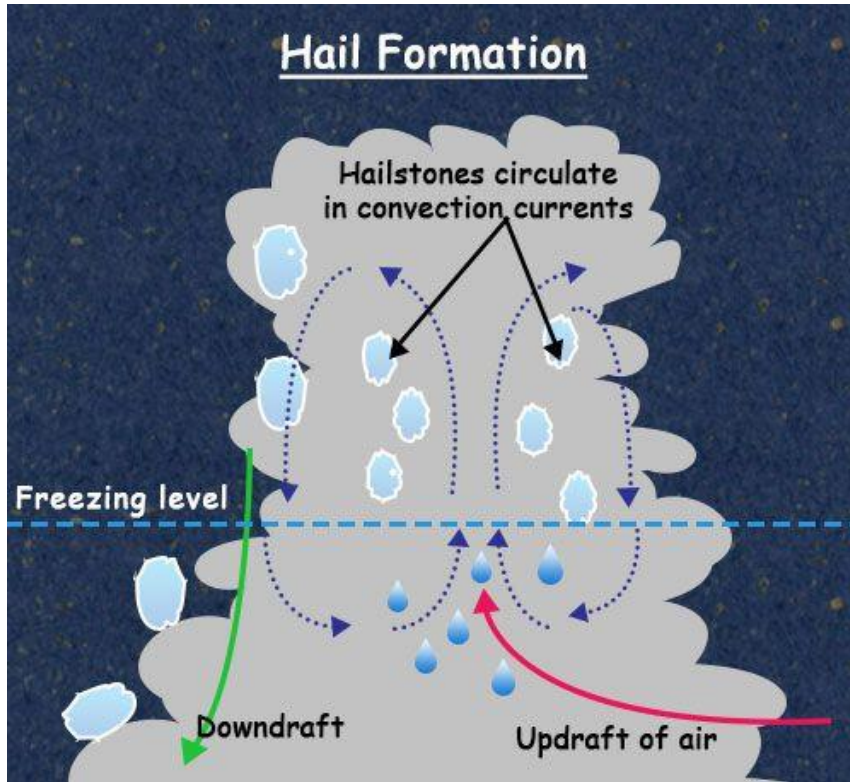
Günümüze kadar yapılmaya çalışılan suni dolulara, alternatif ve en güvenilir yeni bir yol olarak sıvı nitrojen dondurmalı dolu yapımı literatüre eklenecektir. Bu dolu tamamen doğal yollarla oluşturulup, bundan önce

yapılan suni dolular gibi katkı maddeleri veya plastikler kullanılıp yapılmamıştır. Bu doluyu diğerlerinden ayıran unsurlardan bir tanesi de budur ama en önemli özelliği gerçek dolu gibi kırılmayıp katmansal bir yapıya sahip olmasıdır.

3.2.1. Sıvı Nitrojen İle Suni Dolunun Oluşum Teorisi (Formation Theory Of Artificial Hailstone With Liquid Nitrogen)

Dolu oluşumu, dikey bir bulut olan kümülonimbus bulutlarında gerçekleşmektedir. Bu bulutlar dikey olarak kümülüs bulutlarının büyümesiyle oluşmaktadır. İçlerinde dolu, fırtına ve elektrik yükü (şimşek) bulundurmaktadırlar ve bu durumdan dolayı hava araçları da bu bulutların içine girmekten kaçınmaktadır. Dikey bu bulutların içinde sert hava akımları olmaktadır. Ayrıca bu bulutlar dikey konumlarından dolayı taban ve tavan arasında sıcaklık farkına sahiptir. Dolunun oluşumu bu ani hava akımı ve ani değişen sıcaklıklarla olmaktadır. Dolu Lauri'nin(1960) makalesinde belirttiği gibi toz, tuz gibi partiküllere su buharının tutunmasıyla başlamaktadır ve bu partikül dolunun embriyosu olarak adlandırılmaktadır. Katman Katman donan ve taban ile tavan arasında gidip gelen parçacıklar birbirine tutunmakta ve ağırlaşmaktadır. Bulutun içindeki hava akımının kaldırma kuvvetinden daha fazla ağırlığa sahip olduklarında ise Şekil 1'deki gibi yeryüzüne düşerler.

Kümülonimbus bulutlarında gerçekleşen su buharının ve damlacıklarının ani donma olayını laboratuvar ortamında gerçekleştirmek gereksinimi tespit edilmiştir. Anlatılan bu olayı ve sıcaklık farklılığındaki donmayı simüle etmek için Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Dolu Laboratuvarında bir dizi araştırmalar ve denemeler yapılmıştır. Kümülonimbus bulutlarında gerçekleşen bu hava olayını Laboratuvar şartlarında yapmak için çalışmalara ve alt yapı oluşturulmaya başlanmıştır. Bu çalışma için çok soğuk bir malzemeye (minimum -40°C) ve +0°C derecede suya ihtiyaç vardır. Negatif derecedeki malzeme için sıvı nitrojenin simule edileceği öngörülmüştür. Bunun için dewar kabı ve sıvı nitrojen tedarik edilmiştir. Ayrıca dolunun tutunacağı bir embriyo oluşturulması gerekmektedir. Bunun için bir çeşit ipin ucuna ufak bir düğüm atarak bu embriyonun oluşturulması düşünülmüştür. Bu uygulama teorisinde, Kümülonimbus bulutunda oluşan dolunun embriyosu ip düğümü, bulutun tavanı sıvı nitrojen tabanı ise +0°C su olarak eşlenmiştir. Bu sayede aynı Kumulonimbus bulutlarındaki gibi suyun katman katman ve ani bir şekilde donmasını sağlayacaktır. Ayrıca ani donma su partiküllerinin kristal etkisi gösterip kırılmama özeliğini de arttıracaktır.

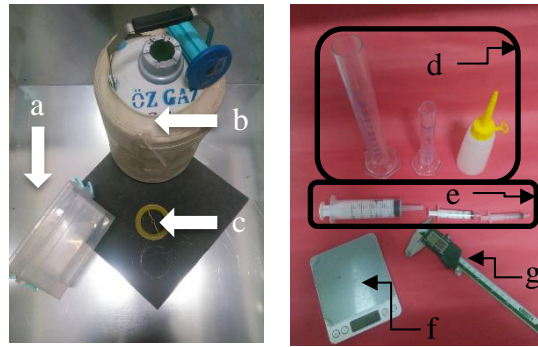


Şekil 2. Dolu oluşum anlatımı ve kümülonimbus bulutu (Hail formation and cumulonimbus cloud)

3.3. Sıvı Nitrojen İle Suni Dolunun Laboratuvarda Oluşturulması ve Kullanılan Malzemeler (Forming artificial hailstone with liquid nitrogen in the laboratory and materials used)

Azot (sıvı nitrojen): kimyasal simgesi "N" olan ametal bir elementtir. Doğada serbest azot iki atomlu "molekül halinde" bulunduğundan dolayı "N₂" olarak simgelenir. Sıvı nitrojenin bazı fiziksel özellikleri şunlardır: Maddenin hâli gaz, sıvı hâldeki yoğunluğu 0,808 g/cm³, kaynama noktası -196°C derece ve erime noktası -210°C derecedir. Şekil 2 de görülen malzemeler ile dolu yapımı gerçekleştirilmiştir.

Saf su: Saf su denildiğinde aklımızda ilk etapta temiz su gelmektedir, fakat bu düşünce yanlıştır. Su, iki hidrojen ve bir oksijen atomundan meydana gelmektedir. Ancak bunun yanı sıra içerisinde kalsiyum, magnezyum, bikarbonat gibi mineraller dâhil farklı maddeler de yer almaktadır. Saf su ise, suyun içerisindeki bu minerallerin ve maddelerin, farklı kimyasal süreçlerden geçirilerek ve genellikle 80°C dereceye kadar ısıtılan suyun buharının yoğunlaştırılarak ayrı bir kaba aktarılmasıyla elde edilmektedir. Bu çalışmada saf suyun kullanılmasının nedeni ise bulutlardaki su parçacıklarına yakın olmasıdır. Yaptığımız çalışmada 4°C derecelik saf su kullanılmıştır. Ayrıca yağmur suyu yeryüzüne düşerken havadaki partiküllerin karışmasıyla saf su özelliğini kaybetmektedir. Bundan dolayı yağmur suyu, musluk suyu, doğal kaynak suyu gibi sular kullanılmamıştır. Bulutlarda bulunan su buharının yoğunlaşmasında ortaya çıkan su, yeryüzünde en yakın olarak laboratuvar şartlarında üretilen saf suya eş çıkmaktadır.



- | | |
|---------------|-------------------------|
| a) Su Kapları | d) Dereceli Silindirler |
| b) Dewar Kabı | e) Şırıngalar |
| c) Misina | f) Hassas Terazi |
| | g) Kumpas |

Şekil 2. Sıvı nitrojenli dolu yapımında kullanılan materyaller (Materials used for making of liquid nitrogen hail)

Sıvı Nitrojen Tankı ve Dewar Kabı: Sıvı nitrojenin çevresel faktörlerden etkilenmeden ve kolayca taşınabilmesi için gereken sıvı nitrojen tankı sayesinde, sıvı nitrojen buharlaşmadan ve tehlikeli durumları engelleyerek saklanmaktadır. Dewar kabına, sıvı nitrojen tankından aktarılan, sıvı nitrojen sayesinde dewar kabı üzerinde çalışma yapılabilmektedir.

Saf su Tankı ve Su kapları: Saf su tankı sayesinde kullanacağımız saf suyun bozulmasının engellenmesi ve sonuçların ideale yakın çıkması hedeflenmiştir. Su kapları ise dewar içindeki sıvı nitrojen ve suyun daldırma işlemi sürekliliğini sağlayacaktır.

Misina ve Daldırma Düzeneği: Misina, dolu içerisinde bulunan "dolunun çekirdeği" adı verilen kısım görevini görecek ve su tutarak, dolu yağışlarına neden olan Kümülonimbus bulutlarının içerisindeki durumu simüle edecektir. Misinanın bağlı olduğu daldırma düzeneği ise, bir seferde daha fazla dolunun ortaya çıkmasını ve kullanım kolaylığı sağlayacaktır.

Dolu Atış Silahı ve Atış Testleri: Bir pnömatik atıcı, yüksek basınca dayanıklı hava tankı, hava kesici, namlu, hızölçer sensörler, yüksek hızlı kamera, barometre ve kompresörün bulunduğu Şekil 2'de gösterilen dolu atış silahı sayesinde, çap ve kütleleri ölçülmüş, yoğunlukları hesaplanıp numaralandırılmış olan Suni dolular, farklı kalınlıktaki çatı panellerine atılmaktadır.

Şekil 3'deki sitemde kompresörden çıkan hava, yüksek basınca dayanıklı hava tankına dolmaktadır. Bu tank içerisinde bulunan havanın basıncı barometre yardımıyla kontrol edilmektedir. Basıncı 3 ile 3.5 bar arasında olduğunda pnömatik kesici buton ile devre dışı bırakılarak basınçlı hava namludan çıkmaktadır. Namlunun içerisine koyulan suni dolu bu hava basıncı ile çapına ve ortam koşullarına bağlı olarak 70-110 km/s hızlarda Koruma kafesi içerisindeki plakaya çarpılmaktadır. Bu çarpışma sonucunda oluşan çukur, dolu hasarını, dolunun

durumu ise dolu dayanımını temsil etmektedir. Suni dolunun namludan levhaya çarpana kadar olan hızı ise hız sensörü ve yüksek hızlı kamera ile ikili olarak ölçülüp teyit edilmektedir. Namlu ile levha arasında 1 metre mesafe bulunmakta ve testler bu şekilde yapılmaktadır.



Şekil 3. ADÜ dolu atış test laboratuvarı (ADU - Hailstone test laboratory)

3.4. Sıvı Nitrojenli Dolu Yapımı (Liquid Nitrogen Hailstone Construction)

Nitrojenli Dolu yapımında iki adet kap kullanılmaktadır. Bu kaplardan bir tanesi saf su ile doldurulmaktadır. Diğer kap ise dewar kabıdır ve içine sıvı nitrojen konulmaktadır. Misinin ucuna nitrojen ve su toplanması için düğüm atılır ve bu işlem sayesinde doğal dolu yapısında bulunan "dolu çekirdeği" simüle edilmektedir. Bu işlemden sonra saf suya batırılan düğüm atılmış misina dewar kabındaki sıvı nitrojen içine daldırılarak suyun ani bir şekilde donması sağlanmaktadır. Bu uygulamanın amacı doğal dolunun yapısındaki gibi katmanlı bir şekilde donması sağlamaktır. Sıvı nitrojenli dolu yapımının diğer suni dolu yapım yöntemlerinden farklı ve en önemli ayırt edici özelliği de budur. Daldırma işlemleri dolu istenilen çapa gelinceye kadar tekrarlanmaktadır. Misina daldırılan suyun doğal doludaki sıcaklık değerine yakın olması için saf suyun içine buz konulmaktadır. Bu işlem yapılarak kümülönimbus bulutlarında 0 ile -40 derece olan sıcaklık farkını simüle etmektedir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Dolu atış testleri ve analizlerinde kullanılan suni dolularla sıvı nitrojen kullanılarak yapılan dolunun karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmalarda Kullanılan Suni Doluların Gerçek Dolunun Karakteristik Özellikleri ile Karşılaştırılması (Comparison of artificial hailstones used in studies with the characteristic features of Real hailstones)

	Yoğunluk(g/cm ³)	Kristal Yapı	Kırılmama	Katmanlı yapı
Çelik Top	X	X	✓	X
Saf sulu Dolu	✓	X	X	X
PVA'lı Dolu	✓	X	✓	X
Nitrojenli Dolu	✓	✓	✓	✓
Gerçek Dolu	✓	✓	✓	✓
Pamuklu Dolu	✓	X	✓	X

Sıvı nitrojen kullanılarak yapılan dolunun yoğunluk hız ve kırılma açısından test sonuçlarının değerlendirilmesi Tablo 3'de verilmiştir. PVA'lı dolu ile yapılan atış sonuçları kamera ve sensörde ölçülen hızları ve atış sonrası durumu Tablo 4'te yapay dolu üretiminde kullanılan yöntemler de verilmiştir.

Bu çalışmanın önemi sıvı nitrojen kullanılarak yapılan dolunun doğal dolunun kırılmama karakteristiğini gösterdiğini kanıtlamasıdır. Bu çalışmada 5 adet kırılan 5 adet kırılmayan dolunun bulunması çalışmanın seyri açısından çok önemlidir. Doluyu simüle etmenin en önemli özelliği kırılmamasıdır ve bu kırılmama dolu deneylerinde ancak çelik top, pamuklu buz gibi materyallerle sağlanılmaya çalışılmaktadır ki bu testler dolu karakteristiği göstermedikleri için başarılı sonuçlar verememişlerdir. En yakın olarak PVA bazlı Dolu kullanılmıştır. Sıvı nitrojen ile yapılan testlerde en iyi sonucu sıvı nitrojenli dolunun verdiği gözlemlenmiştir.

Sıvı nitrojen kullanılarak yapılan dolunun ve diğer suni doluların kesitleri Şekil 4'te verilmektedir. Bu kesit alanları doluların iç kısımlarının nasıl oluştuğuna dair bizlere önemli bilgiler vermektedir. Ayrıca doğal doluda oluşan katmansal yapının sıvı nitrojenli suni doluda da gözlemlenebildiğini göstermektedir.

Tablo 3. Sıvı Nitrojen Dondurmalı Dolunun Yoğunluk, Hız ve Atış Sonrası Durumları (Density, speed and situation of liquid nitrogen freeze hailstone after impact)

Atış Numarası	Dolu Çapı (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Hız (m/s)		Atış Sonrası Dolu Durumu
			Kamera	Sensör	
1	41.98	1084.24	25.71	24.77	Kırıldı
2	44.94	1077.63	27.41	23.32	Kırılmadı
3	47.63	1049.86	30.56	26.11	Kırıldı
4	48.99	1163.03	28.29	23.37	Kırıldı
5	49.25	989.83	25.47	22.52	Kırılmadı
6	48.02	1012.24	28.48	27.72	Kırılmadı
7	46.37	1088.02	29.17	24.81	Kırıldı
8	48.15	997.63	29.59	26.47	Kırılmadı
9	48.84	996.53	31.06	33.86	Kırılmadı
10	49.21	934.54	28.18	27.05	Kırıldı

Tablo 4. PVA'lı Dolunun Yoğunluk, Hız ve Atış sonrası Durumları (Density, speed and situation of PVA hailstone after impact)

Atış Numarası	Dolu Çapı (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Hız (m/s)		Atış Sonrası Dolu Durumu
			Kamera	Sensör	
1	49.86	990.53	29.41	31.79	Kırılmadı
2	50.58	953.45	31.93	31.47	Kırılmadı
3	37.79	994.44	27.34	30.06	Doluda Hafif kırık oluştu
4	37.21	1011.74	27.5	29.52	Kırıldı
5	37.57	1026.41	30.92	27.05	Kırıldı
6	44.51	1002.56	30.48	31.94	Kırıldı
7	44.88	982.42	31.99	31.83	Kırıldı
8	44.22	1009.62	30	28.39	Kırıldı
9	44.65	971.71	30.87	31.56	Kırıldı
10	44.96	964.36	28.33	31.94	Kırılmadı



a) %12'lik PVA'lı dolu



b) Saf su ile dolu



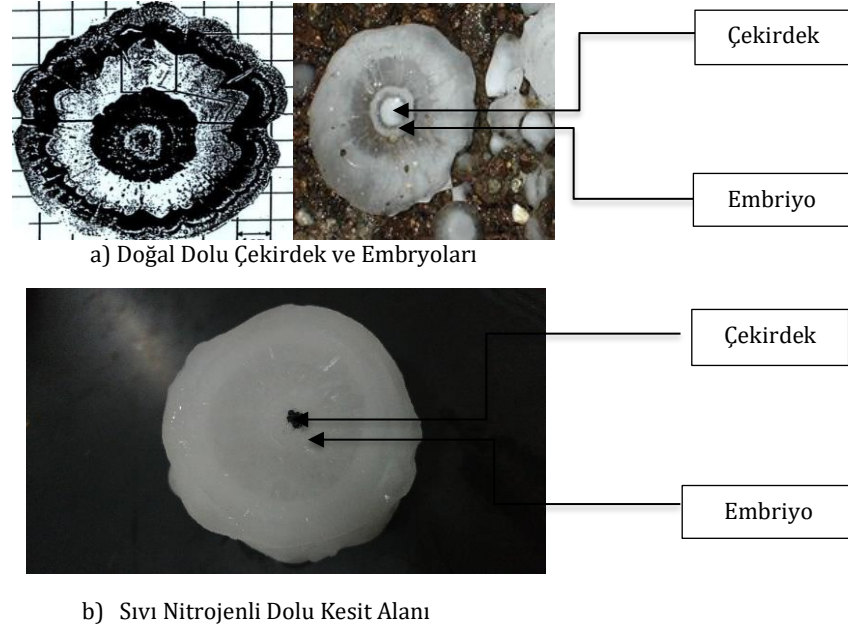
c) Sıvı nitrojenli dolu



d) Doğal dolu

Şekil 4. Kullanılan bazı suni doluların ve gerçek dolunun kesit alanı (Cross-sectional area of some used artificial hail and real Hail)

Şekil 5'te doğal dolu ve nitrojenli dolunun çekirdeği ve embriyo kısımları verilmiştir. Şekil 5 oluşum açısından birbirlerine benzerliklerini göstermektedir. Bu benzerlik doğal dolunun bir diğer ayırt edici özelliği olan çekirdek-embriyo yapı ikilemesinin sıvı nitrojenli doluda oluştuğunu da ispatlamaktadır.



Şekil 5. Sıvı nitrojen dondurmalı dolu ve gerçek dolunun iç kısımlarının görsel olarak karşılaştırılması (A visual comparison of the inner parts of the liquid nitrogen freeze hail and the real hail)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yaptığımız bu çalışmada azotlu dolu ile 40 adet atış desti yapılmıştır. Bu atış testinde kullanılan doluların çapı 40 ile 50 mm arasında değişmektedir. Ayrıca yapılan bu atış deneylerinde dört farklı kalınlıkta sahip olan çelik plakalar kullanılmıştır. Kullanılan çelik levhaların kalınlığı; 0.30, 0.45, 0.60 ve 0.7 mm'dir ve atışlardan elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5'te yapılan çalışmalarda, nitrojen ile dondurulan suni dolular farklı kalınlıklardaki plakalara atılmış, hız, yoğunluk ve kırılım durumları gözlemlenmiştir. Testler neticesinde, imal edilen suni dolunun 0.3 mm, 0.45 mm ve 0.6 mm kalınlıklarda daha iyi performans gösterdiği, 0.7 mm kalınlıktaki plakada ise daha düşük performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Dolunun aynı şartlarda farklı kırılım davranışları göstermesinin sebebi, el ile manuel bir şekilde suni dolu oluşturulmasından kaynaklı; sıcaklık, tozlaşma, bekleme süresi gibi çevresel faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek standart bir dolu üretimi yapmak için 0oC de oda, otomatik dolu üretim makinası gibi AR-GE faaliyetleri gibi çalışmalar sürmektedir. Doğal dolu farklı çaplarda meydana gelerek günlük hayatta birçok maddi ve can kayıplarına sebep olmaktadır. Dolunun Yoğunluk, kristal yapısı, katmanasal yapı ve diğer karakteristik özellikleri vardır. Bu çalışmaya kadar birçok araştırmacı farklı malzemeler ve birbirinden farklı yöntemler kullanarak yapay dolu üretilip çarpma deneyleri yapmışlardır. Fakat bu çalışmalar dolunun karakteristik özelliklerinin hepsini göstermede yetersiz kalmıştır. Tablo 3'te verilen Sıvı Nitrojenli dolu ile Tablo 4'teki PVA'lı (Polivinil Asetat) dolunun yapılan deney sonuçlarını göz önüne alırsak, sıvı nitrojen kullanarak yapılan dolunun Yoğunluğu, kristal yapısı, katmanasal bir yapıya sahip olması ve yapılan çarpma deneyleri sonucunda kırılmama özelliğini PVA'lı (Polivinil Asetat) doluya göre daha iyi sonuç sağlayarak literatürdeki bu eksikliği gidermektedir. Bu çalışma sayesinde, dolu testlerinde yeni ve güvenilir bir yöntem ortaya çıkmıştır. Daha sonra yapılacak çalışmalar için diğer araştırmacılara yol gösterici bir çalışma niteliğindedir.

Tablo 5. Sıvı azotlu dolunun deneyde elde edilen verileri (Data of liquid nitrogen hailstone obtained in the experiment)

Atış No	Plaka Kalınlığı (mm)	Dolunun Çapı (mm)	Atış Basıncı (bar)	Dolunun Yoğunluğu (g/cm ³)	Atış Hızı (m/s)		Atış Sonrası Dolunun Durumu
					Sensör	Kamera	
1	0.3	46.483	3.2	1007.826	28.51	24.52	Sağlam
2	0.3	46.937	3.3	938.271	29.38	29.12	Kırıldı
3	0.3	47.287	3.3	979.004	34.65	29.12	Sağlam
4	0.3	47.910	3.3	927.394	32.37	28.55	Üçe Kırıldı
5	0.3	48.903	3.3	955.305	25.13	25.76	Sağlam
6	0.3	47.430	3.3	971.945	22.98	22.54	Kırıldı
7	0.3	46.153	3.3	949.951	40.09	33.56	Sağlam
8	0.3	49.443	3.3	924.345	32.78	31.56	İkiye Kırıldı
9	0.3	46.670	3.3	963.841	27.82	24.42	Üçe Kırıldı
10	0.3	49.093	3.3	966.853	23.32	23.48	Kırıldı
11	0.45	48.103	3.2	990.038	20.90	21.04	Üçe Kırıldı
12	0.45	47.753	3.4	989.167	34.15	33.06	Kırıldı
13	0.45	49.187	3.3	969.385	32.59	29.48	Kırıldı
14	0.45	46.343	3.3	1053.445	26.08	27.91	Sağlam
15	0.45	48.723	3.3	969.234	37.72	31.94	İkiye Kırıldı
16	0.45	46.143	3.3	1006.942	27.49	31.00	Üçe Kırıldı
17	0.45	47.097	3.2	996.385	24.19	26.52	İkiye Kırıldı
18	0.45	47.687	3.2	938.723	46.94	23.29	Sağlam
19	0.45	49.337	3.3	1005.099	111.43	31.13	İkiye Kırıldı
20	0.45	48.067	3.3	975.107	25.07	28.05	Üçe Kırıldı
21	0.6	41.980	3	1084.235	24.77	25.71	Kırıldı
22	0.6	44.937	3.1	1077.628	23.32	27.41	Sağlam
23	0.6	47.633	3.3	1049.852	26.11	30.56	Kırıldı
24	0.6	48.990	3	1163.033	23.37	28.29	Kırıldı
25	0.6	49.247	3.2	989.832	22.52	25.47	Hafif Hasar
26	0.6	48.023	3.3	1012.238	27.72	28.48	Sağlam
27	0.6	46.370	3.3	1088.024	24.81	29.17	Üçe Kırıldı
28	0.6	48.147	3.4	997.634	26.47	29.59	Sağlam
29	0.6	48.843	3.4	996.527	33.86	31.06	Hafif Hasar oluştu
30	0.6	49.207	3.4	934.540	27.05	28.18	Kırıldı
31	0.7	47.210	3.3	981.966	34.51	35.96	Kırıldı
32	0.7	47.443	3.2	989.011	25.16	28.29	Üçe Kırıldı
33	0.7	49.630	3.2	978.009	28.98	28.29	Kırıldı
34	0.7	48.233	3.2	937.802	26.90	26.77	Kırıldı
35	0.7	48.250	3.2	964.034	28.61	26.05	Kırıldı
36	0.7	47.343	3.3	1027.687	34.15	29.22	Kırıldı
37	0.7	45.247	3.3	1032.950	39.59	36.99	Kırıldı
38	0.7	47.037	3.1	994.698	23.66	23.67	Kırıldı
39	0.7	47.197	3.2	1017.315	30.88	32.20	Kırıldı
40	0.7	48.283	3.2	953.555	28.49	26.30	Kırıldı

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Adnan Menderes Üniversitesi BAP projeleri MF-17022 ve MF-18004 kapsamında desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynakça (References)

- Sain, T. and Narasimhan, R., (2011), Constitutive Modeling of Ice in The High Strain Rate Regime. *International Journal of Solids and Structures*, 48, 817-827.
- Knight, C.A. and Knight, N.C., (1976), Hail Embryo Studies. *International Conference on Cloud Physics*, Boulder, Colorado. Boston, Mass. American Meteorological Society. United States.
- Crenshaw, B.V. and Koontz, J.D., (2002), Hail : Sizing It Up !*Western Roofing Magazine*, 2-7.
<https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-hail#top>
- Uz ME, Yilmaz G, Bircan T (2017) The making of a hailstone simulated realistic damage. *Journal of Engineering Sciences and Design* 5(2):411-423. <https://doi.org/10.21923/jesd.327312>.
- Uz ME, Teh L, Maguire J (2014) Developing Australia's first hailproof roofing profiles. Research case study. Open Days's poster, SBRC
- Shi, M. F.; Brindza, J.; Michel, P.; Bucklin, P.; Belanger, P. and Prencipe, J., (1997), Static and Dynamic Dent Resistance Performance of Automotive Steel Body Panels. SAE Technical Paper.
- Swift JM (2013) Simulated hail ice mechanical properties and failure mechanism at quasi-static strain rates. University of Washington, USA
- Laurie JAP (1960) Hail and Its Effects on Buildings. vol 176. Research Report, NBRI, Pretoria, South Africa
- Mccormick, M.; Fekete, J.; Meuleman, D. and Shi, M., (1998), Effect of Steel Strengthening Mechanisms on Dent Resistance of Automotive Body Panels. SAE Technical Paper.11. Nelson S. P., (1983), The influence of storm flow structure on hail growth. *J. Atmos. Sci.*,40, 1965-1983.
- Nomura, S.; Yutori, Y.; Iwaya, J.; Miyahara, M. and Kokubo, I.A., (1984), Study of the Dynamic Dent Resistance. 13th. Biennial Congress International Deep Drawing Research Group-Efficiency in Sheet Metal Forming.
- Johnson, T.E. and Schaffnit, W.O., (1973), Dent Resistance of Cold-Rolled Low-Carbon Steel Sheet. SAE Technical Paper, 730528
- Fleming, H.G.; Skarajew, M.; Szalla, (1997), J.A.G. A Laboratory Dent Test for Outer Panel Steels.
- Brimelow, J.C.; Reuter, G.W. and Poolman, E.P. (2002a): Modeling maximum hail size in Alberta thunderstorms. *Wea. Forecasting*, 17, 1048-1062.
- Dunlop, S., (2008), *Oxford Dictionary of Weather* 2nd Ed., New York: Oxford University Press
- Flüeler, P.; Stucki, M.; Guastala, F. and Egli, T., (2008), Hail Impact Resistance of Building Materials Testing, Evaluation and Classification. 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components ISTANBUL. Turkey: Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.
<https://agroinsurance.com/en/spain-hail-storms-in-province-of-alicante-cause-3-million-euro-worth-of-damage/>



FOREX PİYASALARI İÇİN BAYES TEKNİĞİ İLE OTOMATİK AL/SAT SİNYALİ ÜRETİLMESİ

Özkan ÜNSAL^{1*}, Mehmet Emin KAYA²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilgisayar Bilimleri, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kaldıraçlı Piyasalar,
Forex,
Makine Öğrenmesi,
Veri Madenciliği,
Naive Bayes.

Öz

Kaldıraçlı döviz alım-satım piyasası, yaygın olarak bilinen ismiyle Forex veya FX, günlük 5,5 trilyon dolarlık işlem hacmiyle dünyanın en büyük para piyasasıdır. Forex piyasalarında fiyat yönünün tahmini ve işleme girme yöntemleri gelişen teknolojiye paralel olarak her geçen gün değişmekte ve geçmiş veriler ile eğitilerek karar verebilen robotların bu alanda etkisi giderek artmaktadır. Makine öğrenmesi, bilgisayarların geçmiş bilgilerden elde edilen tecrübelerden yararlanarak, gelecekteki olayları tahmin etmesine ve modelleme yapmasına imkân veren bir yapay zekâ alanıdır. Bu çalışmada, bir makine öğrenme tekniği olan "Naive Bayes" algoritması kullanılarak, geçmişteki veriler ışığında güncel duruma uygun AL ya da SAT sinyali üreten ve bu yönde otomatik işlem açan bir robot geliştirilmiştir. Robot EUR/USD, GBP/USD, USD/JPY, USD/CHF, USD/CAD, GBP/JPY ve AUD/USD paritelerine ait geçmiş veriler üzerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlandığında Forex piyasaları için üretilen sinyallerin başarılı olduğu görülmüştür.

AUTOMATIC BUY/SELL SIGNAL PRODUCTION FOR FOREX MARKETS BY BAYES TECHNIQUE

Keywords

Leveraged Markets,
Forex,
Machine Learning,
Data Mining,
Naive Bayes.

Abstract

The leveraged currency trading market, commonly known as Forex or FX, is the world's largest money market with a daily transaction volume of \$ 5.5 trillion. The forecasting and processing methods of the price direction in the Forex markets are changing day by day in parallel with the developing technology and the effect of robots, which can make decisions by being educated with the historical data is increasing in this field. Machine learning is an artificial intelligence field that allows computers to predict future events and model by utilizing the experience gained from historical knowledge. In this study, by using a machine learning technique "Naive Bayes" algorithm, a robot has been developed which produces an BUY or SELL signal according to the current situation and opens an automatic process in the light of historical data. The robot is applied to the historical data of EUR/USD, GBP/USD, USD/JPY, USD/CHF, USD/CAD, GBP/JPY and AUD/USD parities and when the results are interpreted, it is seen that the signals produced for the Forex markets are successful.

Alıntı / Cite

Ünsal, Ö., Kaya, M.E., (2020). Forex Piyasaları İçin Bayes Tekniği İle Otomatik Al/Sat Sinyali Üretimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1190-1201.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Ünsal, 0000-0002-6741-7826
M.E. Kaya, 0000-0002-4529-073X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	29.01.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

*İlgili yazar / Corresponding author: ozkanunsal@gmail.com, +90-554-797-4296

1. Giriş (Introduction)

FOREX Piyasası (Foreign Exchange Market veya FX), birçok katılımcı tarafından, önceden belirlenmiş şartlarda (fiyat, zaman, hacim) gerçekleştirilen tüm döviz alım-satım işlemlerinin toplamını ifade etmektedir (Guliyev ve Gurbanzade, 2008). Forex piyasalarında alım-satımı yapılan "ürün" farklı ülkelerin para birimleridir. Örneğin yatırımcı, ABD Doları ile Euro alabilmekte veya Kanada Doları karşılığında Japon Yeni satabilmektedir. Burada fiziksel para ödenmesi söz konusu değildir. Kişi yalnızca kendi arzu ettiği parite(para çifti) ile ilgilenip, sanal olarak ticaret yapmaktadır. Ticaretten kasıt, düşük fiyattan bir para birimini alıp yükseldiğinde satmak ya da yüksek fiyattan bir para birimini satıp düştüğünde almaktır. Böylece piyasada yer alan kişiler bu yolla kâr elde etmeyi amaçlamaktadırlar.

Günlük ortalama 5,5 trilyon dolarlık işlem hacmiyle devasa bir piyasa olan Forex'teki işlemlerin insan eliyle yapılması ve takip edilmesi zor olduğu kadar hedeflenen getiri açısından da oldukça verimsizdir. Yatırımcılar bu büyük veri içerisinde ihtiyaç duydukları tahminlere ancak profesyonel analizler ve bu analizler ışığında çeşitli yapay zekâ teknikleri ile geliştirilmiş otomatik AL/SAT sinyali üretebilen karar destek sistemleri ile ulaşabilmektedirler.

Makine öğrenmesinin eğitim, finans, tıp, trafik ve meteoroloji gibi birçok farklı alanda elde edilen geçmiş veriler üzerinde uygulanması ile gelecekte olabilecek durumların tahmini ve verilerin sınıflandırılması işlemi yapılabilmektedir. Bu tahminlerin en önemli özelliği, gerçekleşmesi uzun sürebilen ve gerçekleştikten sonra geri dönülmez sonuçlar doğurabilen olayların önceden öngörülebilmesidir. Makine öğrenmesi, sosyal medya analizi (Çelik vd., 2020) ve kablosuz ağlar için konumlandırma sistemlerinin geliştirilmesi (Kırbaş ve Arslan, 2020) gibi yeni araştırma alanlarında da kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi ve veri madenciliği arasında doğrudan bir ilişki vardır. Makine öğrenmesi tekniklerinin büyük veritabanlarına uygulanması veri madenciliğidir (Alpaydın, 2004). Makine öğrenmesi, veri madenciliği sürecindeki uygulama aşamasında yer almaktadır. Bu aşamada seçilen bir makine öğrenmesi tekniği veri seti üzerine uygulanarak sonuçlar elde edilir. Makine öğrenmesi yalnızca veriler üzerinde uygulanan bir teknik değil, aynı zamanda bir yapay zekâ alanıdır. Bir makine öğrenmesi tekniği olan Bayes teoremi, İngiliz matematikçi Thomas Bayes tarafından ortaya konulmuştur. Bayes teoremi, Thomas Bayes'in yaşamından sonra geliştirilerek tıp, ekonomi, istatistik, arkeoloji, hukuk, atmosfer bilimi, ölçme değerlendirme, fizik, genetik gibi birçok alanda uygulanmıştır (Murat, 2007).

Yapılan çalışmada, teknik göstergeler kullanılarak, Forex veri seti üzerinde çalışabilecek Naive Bayes tabanlı otomatik bir alım-satım sistemi geliştirilmeye çalışılmıştır. Sistemin, daha önce belirlenen noktaların teknik gösterge değerlerini alarak ve güncel fiyat hareketlerinin önceki hareketlere göre keşifsel yöntemleri kullanarak alım-satım yönünde öneride bulunması amaçlanmıştır. Söz konusu sistem için C#.NET ve MQL dili ile bir robot geliştirilmiştir. Robot Metatrader 4 platformu kullanılarak EUR/USD, GBP/USD, USD/JPY, USD/CHF, USD/CAD, GBP/JPY ve AUD/USD paritelerine ait 1 yıllık bir zaman serisi boyunca elde edilen geçmiş veriler üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde geliştirilen sistemin gelecek vaat ettiği değerlendirilmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümünde Forex piyasalarına yönelik gerçekleştirilen çalışmaların kaynak araştırması yapılmış ve fiyat tahmininde kullanılan yöntemlere ait çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde Forex piyasalarının genel yapısı ve makine öğrenmesi ile veri madenciliğinden bahsedilerek, makine öğrenmesi tekniklerinden Bayes yönteminin Forex verilerine uygulanması ile AL/SAT sinyali üretimi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise otomatik sinyal üretmeyi sağlayan robotun tasarım aşamaları ile robota uygulanan backteste (geçmiş verilere yönelik test) ait elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Sonuç bölümünde yapılan çalışma genel olarak değerlendirilmiş ve geliştirilen robotun performansı yorumlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatür incelendiğinde, Forex piyasalarında alım-satım işlemlerine yönelik fiyat yönü tahmininde bulunan birçok yöntemin kullanıldığı çalışma görülmüştür.

Yao ve Tan (2000), gerçekleştirdikleri çalışmada, bir sinir ağı modelinin, Amerikan Dolarının(USD) diğer 5 büyük döviz kuruna (Japon Yeni(JPY), Alman Markı(DM), İngiliz Poundu(GBP), İsviçre Frangı(CHF) ve Avustralya Doları(AUD)) oranının tahmininde uygulanabilir olduğuna dair deneysel kanıtlar elde etmişlerdir.

Cao vd. (2005), yapmış oldukları çalışmada, destek vektör makinelerini kullanarak geliştirdikleri yöntemin Amerikan Doları ile İngiliz Pound'u arasındaki oranın(USD/GBP) zaman serisi bakımından tahmininde başarılı olduğuna dair sonuçlar elde etmişlerdir.

Baasher ve Fakhr (2011), tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, makine öğrenme teknikleri kullanılarak 4 önemli Forex paritesine (USD/JPY), (USD/EGP), (EURO/EGP), (EURO/SAR) ait geçmiş 1852 günlük verilerin sınıflandırılması yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlandığında yapılan sınıflandırmanın günlük fiyat tahmini ve beklenen kâr açısından başarılı olduğu görülmüştür.

Vyklyuk vd. (2013), yaptıkları çalışmada, 2012 yılı Nisan ve Mayıs aylarına ait USD/EUR paritesine ait verilere Sinir Ağlarını kullanarak geliştirdikleri yöntemi uygulayarak söz konusu parite için fiyat tahmini gerçekleştirmiş ve elde ettikleri deneysel sonuçların fiyat tahmininde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Seifollahi ve Shajari (2019), Forex piyasaları için fiyat tahminine yönelik yaptıkları çalışmada, EUR/USD paritesini etkileyebilecek haber başlıklarına metin madenciliği tekniklerini kullanarak geliştirdikleri yöntemi uygulamış ve bu alanda yapılan tahmin çalışmalarına kıyasla başarı oranının %83,33'den %91,67'ye çıktığı sonucunu elde ederek yöntemin fiyat tahmininde yüksek bir doğruluk oranı ile kullanılabileceğini değerlendirmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Forex piyasaları için paritelerin fiyat tahminine yönelik birçok farklı tekniğin uygulandığı görülmüştür. Bahsedilen teknikler ile fiyat tahmini yaparak otomatik işleme girebilen robotlar(algoritmik trade) sayesinde yatırımcıların klasik şekilde işlem yapmaları ve piyasaları takip etmeleri artık çok mümkün olmamaktadır. Önerdiğimiz bu çalışmada, işleme giriş yönü ve kararı belirlenirken literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, sadece paritelerin geleceğe yönelik fiyat tahminiyle yetinilmeyip açık olan aktif pozisyonlar ile serbest bakiye miktarı dikkate alınmıştır. Kaldıraçlı piyasalarda en büyük risklerden birisi fiyat hareketliliğinin(volatilite) çok arttığı dönemlerde açık pozisyonların zarar miktarına göre hesabın tamamen kapanma ihtimalidir. Geliştirdiğimiz robot aynı anda çoklu pariteye yönelik fiyat yönü tahmini yaparak, serbest bakiye miktarı ve aktif pozisyonların kâr/zarar durumuna göre mümkün olan en düşük risk ile işleme girip kâr elde etmeyi amaçlamaktadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmanın bu bölümünde Forex piyasalarının genel yapısı ile teknik analiz süreçlerinden ve makine öğrenmesi ile veri madenciliğinin otomatik AL/SAT sinyal üretimi için Forex verilerine uygulanmasından bahsedilecektir.

3.1. Forex Piyasası (Forex Market)

Forex piyasası, bir ülkenin para biriminin satılıp aynı anda başka bir ülkenin para biriminin alınmasıyla yapılan işlemler bütünüdür (Meydan, 2008). Forex piyasasında kâr elde etme amaçlı yürütülen tüm işlemler, bir ülkenin parası esas alınarak diğer ülke parasının bu esas alınan ülke parası karşısındaki değeri olan pariteler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla piyasada kullanılan pariteler ülkelerin para birimlerinin birlikte yazılmasıyla ifade edilmekte ve çift olarak fiyatlandırılmaktadır; EUR/USD, GBP/JPY, USD/CHF gibi. Burada ilk döviz birimi temel birim (basecurrency), diğer değer eşitliği de karşı birim (counter/quotecurrency) olarak adlandırılmaktadır (Meydan, 2008). Tablo 1'de bazı paritelerin sembolleri ve para birimlerine yer verilmiştir.

Tablo 1. Bazı paritelerin sembolleri ve karşılık gelen para birimleri (Symbols of some parities and corresponding currencies)

Sembol	Para Birimleri
EUR/USD	Euro / Amerikan Doları
GBP/USD	İngiliz Sterlini / Amerikan Doları
USD/JPY	Amerikan Doları / Japon Yeni
USD/CHF	Amerikan Doları / İsviçre Frangı
USD/CAD	Amerikan Doları / Kanada Doları
GBP/JPY	İngiliz Sterlini / Japon Yeni
AUD/USD	Avustralya Doları / Amerikan Doları

Bu piyasanın yatırımcılar açısından bir avantajı, piyasanın kaldıraç oranına sahip olmasıdır. Buna göre Forex piyasasında küçük bir miktar yatırımla yüksek hacimli işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Bunun sayesinde çok büyük kârlar elde edilebilmekte ve sermaye riski düşük tutulabilmektedir. Örneğin broker firması (alım-satım aracı firması) 1:100 oranında kaldıraç sağlıyor ise, yatırılan 100\$ ile 10.000\$ değerinde işlem yapılabilmektedir

(Meydan, 2008). Ancak kaldıraç oranı için doğru risk yönteminin kullanılması gerekmektedir. Çünkü yüksek kaldıraç oranı büyük kârın yanında büyük zarar da getirebilmektedir.

Ickes 2006 yılında yaptığı çalışmada, Forex piyasasının yıllık işlem hacminin yıllık dünya ticaret hacminden 60 kat, dünya gayrisafi milli hâsılasından ise 10-12 kat daha büyük olduğunu söylemektedir. Elbette ki, Bretton Woods antlaşmasının bırakılmasının Forex piyasasının işlem hacminin artmasında büyük katkısı olmuştur. Ickes, Bretton Woods anlaşmasının bırakılması ile özellikle Almanya, İngiltere gibi sanayileşmiş ülkeler başta olmak üzere, tüm ülkelerin döviz alım-satımındaki günlük işlem hacminde %50'ye kadar artış olduğunu göstermiştir (Ickes, 2006). Forex piyasasındaki bu gelişme, dış ticaretin gelişimine katkı sağlamış, aynı zamanda ülkelerin kârlılığını da artırmıştır. Forex piyasasının işlem hacminin bu şekilde büyük olması yatırımcılara yüklü hacimde işlem yapabilme olanağı sunmaktadır. Günümüz teknolojik imkânları ile birlikte bu işlemler dünyanın her yerinden, internet üzerinden çevrimiçi olarak ve 24 saat boyunca yapılabilmektedir. Bu imkân, yatırımcılar açısından, piyasayı daha cazip ve aktif hale getirmektedir. Çünkü bu sayede yatırımcılar, ekonomik etkisi olması beklenen herhangi bir olayın gerçekleşmesi durumunda, işlemlerine anında müdahale edebilme avantajına sahip olmaktadır.

Günümüzde Forex piyasası, her çeşit ülkeden alım-satım yapan bireyler veya brokerlar(alım-satım araçları) aracılığıyla her an çalışan akışkan bir piyasa haline gelmiştir. Yatırımcıların yatırımları güncel değişimlere bağlı olarak artıp azalmaktadır. Yani, Forex piyasası koşulları o an olan olaylara bağlı olarak anında değişiklik göstermektedir. Böylelikle kısa dönem hareketleri ile yatırımcılar,

- Haftanın 5 günü, günde 24 saat kesintisiz alım-satım yapabilmektedirler.
- Likiditesi yüksek bir piyasa olduğundan birçok parite ile işlem yapmak mümkündür.
- Yüksek volatiliteye sahip piyasalar, yatırımcılara kâr yakalama imkânları sunmaktadır.
- Risk kontrolü için araçlar mevcuttur.
- Anlık düşüş ve yükselişlerden kâr elde edebilme imkânı vardır.
- Çoğu işlemde komisyon alınmamaktadır.
- Düşük maliyetli kaldıraç oranları ile işlem yapabilmek mümkündür.

Forex'in yukarıda verilen özelliklerinden anlaşılabilceği gibi, Forex piyasası yalnızca bir kişinin işleminden etkilenen bir piyasa değildir. Çünkü Forex piyasasında, hiç kimse ya da grup fiyatları belirli bir yönde hareket ettirecek kadar güçlü değildir, yani piyasa "tam rekabet piyasasına" çok yakındır. Bunun sebebi Forex'in dünyadaki en büyük hacme sahip piyasa olmasıdır.

Döviz fiyatlarındaki değişimler zaman içinde belirli bir trend(eğim) oluşturmaktadır. Forex piyasasında kullanılan platformlar aracılığıyla bu trendleri istenilen zaman aralıklarında incelemek mümkündür. Ancak her döviz kuru farklı faktörlerden farklı düzeylerde etkilendiğinden, her döviz kuruna ilişkin grafik de farklı salınlara sahip olmaktadır. Tüm bunların yatırımcı tarafından incelenebilmesi için, Forex piyasası için geliştirilen programlar aracılığıyla bazı teknik araçlar kullanılabilir. Yatırımcılar, burada yaptıkları çeşitli zaman serisi analizlerinden faydalanarak kâr elde etme fırsatı yakalayabilmektedirler.

Forex piyasalarında "Temel Analiz" ve "Teknik Analiz" olmak üzere 2 tip analiz yaklaşımı bulunmaktadır. Temel analiz, piyasa hareketlerini açıklamak amacıyla faiz oranı, ülkelerin ekonomik verileri gibi makro ekonomik unsurlara odaklanır. Teknik analiz ise gelecekteki fiyatları tahmin etmek amacıyla geçmiş piyasa fiyat verileriyle ilgilenir. Teknik analiz 2 temel yaklaşım içermektedir: Grafik analizi ve teknik göstergeler tabanlı fiyat analizi. Grafik analizi, fiyat örüntülerinin tespitiyle ilgilenir. Teknik göstergeler, formasyonları keşfetmek amacıyla fiyat zaman serisi verisini farklı bir zaman serisi verisine dönüştürür. Elde edilen verilerin makine öğrenmesi teknikleriyle anlamlı sonuçlar üretmesi sağlanır. Birçok alım-satım sisteminin yapıtaşı olan teknik göstergeler, Forex ve diğer finansal piyasalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir alım-satım sistemi, piyasada işlem yapmak amacıyla alım-satım sinyalleri üreten, teknik göstergeler veya grafik formasyonları temelli yaklaşımlara dayalı bir sistem olarak tanımlanabilir.

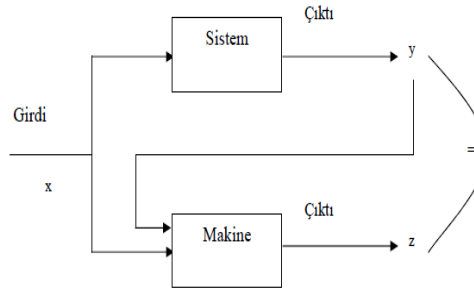
Forex piyasasında "Teknik Analiz" terimi, sayısız alım-satım tekniklerinin genel bir başlığı olarak ele alınmaktadır. Teknik analistler menkul kıymet, döviz gibi varlıkların fiyatlarını, eski fiyatlarına ve diğer ilişkili özet istatistiklerine bağlı olarak tahmin etmeye çalışmaktadırlar. Analistler, bu değişimlerin piyasanın talep grafiğinden ya da dövizin grafiğinden belirlenebileceğine inanmaktadırlar. Teknik analiz 1800'lerde, yatırım analizinin orijinal formu olması bakımından birçok kişi tarafından dikkate alınmaktadır ve bugün kullanılan tekniklerin birçoğundan 1930'lu yıllardan bu yana faydalanılmaktadır (Brock vd., 1992). Bu kapsamda geçmişteki fiyat zaman serisi verileri ve formasyonlarından yararlanılarak gelecekteki fiyat hareketlerinin tahmin edilmesi

mümkün olabilmektedir. Söz konusu tahminler yapılırken indikatör ismi verilen çeşitli göstergelerden yararlanılmaktadır.

Paritenin fiyat hareketlerini esas alarak geliştirilmiş göstergeler olan indikatörler, matematiksel göstergeler anlamına gelirler. İndikatörler, geçmiş verilerin değerlendirilmesiyle, gelecek fiyatların tahmini için matematiksel yöntemlerle sonuç üreten teknik analiz araçlarıdır. Bu tahminlerden çıkan istatistiksel göstergelerle AL/SAT sinyalleri elde edilebilmektedir. İndikatörler, paritelerin teknik analizinin yapılmasına ve yatırım kararlarının alınmasına yardımcı olurlar. Yatırımcının kendi stratejisine en efektif ve mantıklı gelen indikatörü tam anlamıyla kullanabilmesi, onun teknik analiz stratejisinde sağlam bir adım atmasını sağlayabilir (InvestAZ, 2017).

3.2. Makine Öğrenmesi ve Veri Madenciliği (Machine Learning and Data Mining)

Makine öğrenmesinde amaç bilgisayar programlarının kendisine öğretilen tecrübeler yoluyla gelecek durumları tahmin etmesini sağlamaktır. Makine öğrenmesinde tahmin temeline dayanan tekniklerde, veriler eğitim ve test veri seti olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Programlar eğitim veri seti ile eğitilerek, test verileri üzerinde tahmin yapmaya çalışmaktadır. Bu tahminlerden en iyi sonucu elde etmek için eğitim veri setinin geniş tutulması gerekmektedir. Çünkü makineler ne kadar çok öğrenirse o kadar tecrübe edinecek ve iyi sonuçlar üretebileceklerdir. Uzun(2005), Forsyth(1989)'dan yaptığı aktarmada, makine öğrenmesi modelinin çalışma şemasını Şekil 1'deki gibi göstermiştir.



Şekil 1. Makine öğrenmesi çalışma modeli (Machine learning working model)

Şekil 1'de yer alan modelin çalışması aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

1. (x,y) 'nin bir kümesi alınır, burada x bir girdi vektörü ve y uygun bir çıktıdır.
2. $y = f(x)$ fonksiyonu, önceden bildirilen bir modelin oluşumudur;

- Modelin kalite ölçümünde, bir kriter tanımlanır
- Modelin kullanılacağı bir eğitim kümesi oluşturulur
- Modelin kullanacağı geçerli bir test kümesi oluşturulur (Uzun, 2005).

Makine öğrenmesi tekniklerinin büyük veritabanlarına uygulanması veri madenciliğidir (Alpaydın, 2004). Makine öğrenmesi veri madenciliği sürecinde uygulama aşamasında yer almaktadır. Veri madenciliği çıkan bilgi ve bu bilgilerin değerlendirilmesi ile uğraşmaktadır. Makine öğrenmesi ise bu bilgiyi çıkarmayı sağlayan teknikler ve bu teknikleri kullanan bilgisayar programlarının kendilerini geliştirmesi ile ilgilenir. İki konu arasındaki en büyük fark; makine öğrenmesi, öğrenme metotlarını geliştirerek, tahminleri ya da tanımları en iyi şekilde, yüksek performans ile nasıl çıkarabileceği ile ilgilenirken, veri madenciliğinin ortaya çıkan bilgi ile ilgilenmesidir (Dalyan, 2006). Veri madenciliğinin tıp, eğitim, finans ve meteoroloji gibi birçok alanda geçmişte bulunan veriler üzerinde uygulanması ile gelecekte olabilecek durumların tahmini ve verilerin sınıflandırılması yapılabilmektedir. Bu tahminlerin en önemli özelliği, kanser hastalığının teşhisi, bir öğrencinin meslek tercihinin kendisine uygun olup olmaması vb. örneklerdeki gibi gerçekleşmesi uzun sürebilen ve gerçekleştikten sonra geri dönülmesi mümkün olmayan sonuçlar doğurabilen olayların önceden öngörülmesidir. Veri madenciliği insan ve bilgisayarların ortak çabası ile ortaya çıkmıştır. İnsanlar problemleri tarif ederler, veritabanlarını tasarlarlar ve amaçları belirler. Bilgisayarlar ise veriler arasında bu amaçlara uygun verileri eleterek desenleri ortaya çıkartırlar (Weiss ve Indurkha, 1998). Makine öğrenmesi teknikleri uygulanırken birçok algoritma kullanılmaktadır. Bu çalışmada otomatik AL/SAT sinyali üreten sistemin geliştirilmesinde sınıflandırma tekniklerinde yer alan Naive Bayes sınıflandırma algoritması kullanılmıştır.

3.3. Bayes ile Forex Piyasalarında Al/Sat Sinyal Üretimi (Buy/Sell Signal Production in Forex Markets with Bayes)

Veri madenciliğinde sıkça kullanılan Bayesian sınıflandırma tekniği, elde var olan, hali hazırda sınıflanmış verileri kullanarak yeni bir verinin mevcut sınıflardan herhangi birine girme olasılığını hesaplayan bir yöntemdir (Silahtaroglu, 2008). Veri madenciliğinde Bayesian sınıflandırma tekniğine dayanan Naive Bayes algoritması, veriler üzerinde sınıflandırma yapmayı sağlayan en temel algoritmalarından bir tanesidir. Kümeleme yöntemleri değişik sonuçlar üreten modeller olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemlerin hepsinde test verisi formunda yeni bir örneğin, eğitim veri setindeki örneklere göre analiz edilerek sınıflandırılması bulunmaktadır (Witten ve Frank, 2005). Temel olarak verilerin AL(BUY)-SAT(SELL) olarak iki durumu göz önünde bulundurularak çoklu kriterlere göre sınıflandırma yapılmaktadır.

Üyelik sınıfı bilinmeyen bir $X=\{x_1, \dots, x_n\}$ veri setinde her bir x_i özelliğinin, C_1 ve C_2 gibi sınıflardan hangisine ait olduğunun olasılığını hesaplayan Bayes teoremi Eşitlik 1'de ifade edilmektedir:

$$P(C_1|x_i) = \frac{P(x_i|C_1)P(C_1)}{P(x_i|C_1)P(C_1) + P(x_i|C_2)P(C_2)} \quad (1)$$

Burada C_1 ve C_2 olarak gösterilen iki ayrı hipotezin, başka bir deyişle iki ayrı sınıfın olduğu kabul edilmektedir. $P(C_1 | x_i)$ x_i 'nin C_1 sınıfında olma olasılığını ifade etmektedir. $P(x_i)$, x_i değerinin veritabanındaki bulunma sıklığı/sayıdır. Eğer m adet sınıf olduğu düşünülürse bu durumda ifade Eşitlik 2'deki gibidir (Silahtaroglu, 2008):

$$P(X_i) = \sum_{j=1}^m P(x_i|C_j)P(C_j) \quad (2)$$

Bu modelde sınıf(m), algoritmada tahmin yapılırken kullanılacak olan kriterleri temsil etmektedir. Sınıflandırma yapılırken sınıflanmaya girecek olan veri, test veri seti olarak ele alınır. Sisteme daha önceden girilen veriler ise eğitim veri setidir. Eğitim veri setinde her bir örnek, yapılacak olan sınıflandırma sonucuna göre AL/SAT gibi iki duruma sahiptir. Test verisinin sahip olduğu özellikler ile eğitim veri setine göre hangi sınıfa gireceği Naive Bayes algoritması yardımı ile belirlenmektedir. Algoritmada, test veri setinin başarılı olma durumu, test verisinin her bir özelliğinin, eğitim veri setinde AL sınıfına giren veri setlerinin özellikleri ile aynı olanlarının sayısının tüm veri seti sayısına bölünmesi ile ihtimal hesabı yapılarak çarpımları sonucu elde edilen orana göre belirlenmektedir. Her bir kritere ait AL(p) ihtimali hesabı, test verisinde bulunan kritere ait özelliğin/değerin eğitim verisindeki tüm örnekler içerisinde bu özellik ile eşit ve AL sınıfına giren örneklerin sayısının tüm AL örnek sayısına bölünmesi şeklinde bulunur. SAT(q) ihtimali hesabı yapılırken de test verisinde bulunan kritere ait özelliğin/değerin eğitim verisindeki örnekler içerisinde bu özelliğe eşit olan ve SAT sınıfına giren örneklerin sayısı tüm SAT örnek sayısına bölünür. Son olarak test verisinin AL sınıfına girme ihtimali; tüm kriterlerin olumlu ihtimallerinin birbirlerine ve AL örnek sayısının toplam örnek sayısına bölünmesi sonucu ortaya çıkan değer çarpılmasıyla bulunur. SAT sınıfına girme ihtimali hesaplanırken ise tüm kriterlerin olumsuz ihtimallerin birbirlerine ve SAT örnek sayısının toplam örnek sayısına bölünmesi sonucu ortaya çıkan değer ile çarpılması işlemi yapılır. AL(p) ihtimali ve SAT(q) ihtimali hesaplanarak eğer AL(p) ihtimali SAT(q) ihtimalinden daha büyük ise test verisi için AL sınıfına gireceği tahmini yapılmaktadır.

Tablo 2'de algoritmanın hesaplama yaparken kullandığı değişkenler ve matematiksel metodun uygulanması gösterilmektedir:

Tablo 2. Oranların hesaplanmasında kullanılan değişken ve denklemler (Variables and equations used in calculating ratios)

Değişken	Tanım
M	Sınıf Sayısı
N	Toplam Örnek Sayısı
P	AL Örnek Sayısı
Q	SAT Örnek Sayısı
M_p	Test Sınıf Kriterinin AL Eğitim Örnekleri ile Eşleşen Sayısı
M_q	Test Sınıf Kriterinin SAT Eğitim Örnekleri ile Eşleşen Sayısı
AL ORANI	$P/N \times M_{p1}/P \times M_{p2}/P \times \dots \times M_{pm}/P$
SAT ORANI	$Q/N \times M_{q1}/Q \times M_{q2}/Q \times \dots \times M_{qm}/Q$

4. Robot Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar (Robot Design and Experimental Results)

Forex piyasalarında gelecek fiyat tahmini için bir önceki bölümde anlatılan Naive Bayes temelli yöntem kullanılarak otomatik bir AL/SAT sinyali üreten ve bu sinyal doğrultusunda işleme girebilen bir robot tasarlanmıştır. Robot tasarlanırken geçmiş fiyat verilerinin alınması ve piyasaya alım-satım yönünde emir gönderilmesine olanak tanıyan Metatrader platformu ve bu platform üzerinde algoritma yazımı için kullanılan MQL4 isimli programlama dili kullanılmıştır. Metatrader platformundan elde edilen veriler üzerinde Naive Bayes ile geliştirilen yöntemin uygulanması için C#.NET programlama dili ve MSSQL veritabanından yararlanılmıştır.

4.1. Metatrader Platformu ve MQL Programlama Dili (Metatrader Platform and MQL Programming Language)

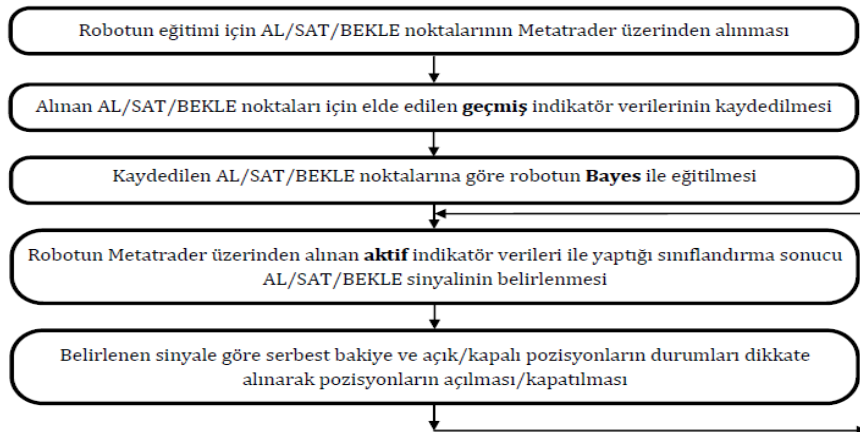
Metatrader, MetaQuotes Software Corporation tarafından bir araya getirilen birçok trader (piyasa oyuncusu) editör tarafından oluşturulmuş, Forex ve benzeri piyasalarda işlem yapılmasını sağlayan bir yazılımdır. Metatrader, günlük olarak yapılan hesap hareketleri, gerçek zamanlı bakiye bilgisi, aktif pozisyonlar, kullanılan emirler, kâr/zarar gibi olay özetlerini saklamaktadır. Bu saklanan özetler işlem yapmadan önce piyasa yönünü ya da trendi belirlemek için yapılan analizlerde kullanılmaktadır. Metatrader üzerinde programcılar kendi algoritma ve stratejilerini geliştirebilecekleri bir platform bulunmaktadır. Metaeditor platformu ile alım-satım emri gönderme işlemleri yapılabilmektedir. Metaeditor üzerinden kullanılan dil yine MetaQuotes firması tarafından geliştirilen Meta Quotes Language (MQL) dilidir. MQL, trading stratejilerinin programlanmasına ve "Uzman Danışmanlar (Expert Advisors – Alım-Satım Robotu)" oluşturulmasına imkân veren ve temel indikatörler ile emirlerin iletilmesini ve yönetilmesini sağlayan komutları içeren gömülü dildir. Şekil 2'de Metatrader platformuna ait arayüz ekranı gösterilmiştir:



Şekil 2. Metatrader platformu ekranı (Metatrader platform interface)

4.2. Robotun Çalışma Adımları (Work Steps of Robot)

Fiyat tahmini için otomatik AL/SAT sinyali üreten ve bu doğrultuda işleme girebilen robotun çalışma şeması Şekil 3'teki gibi gösterilmiştir:



Şekil 3. Robotun çalışma şeması (Work scheme of robot)

ADIM 1: Verilerin elde edilme süreci (Eğitim seti için noktaların belirlenmesi)

Metatrader platformu üzerinde işlem yapabilmek için Uzman Danışmanlar, Teknik Göstergeler (özel göstergeler) yazılabilmektedir. Eğitim seti verisini (AL/SAT/BEKLE noktalarının zaman verileri) almak için platform üzerinde bir indikatör geliştirilmiştir. Bu indikatör ile Şekil 4'te gösterildiği gibi grafik üzerinde bu noktalar belirlenmiştir:



Şekil 4. AL/SAT/BEKLE noktalarının indikatör ile belirlenmesi (Determination of BUY/SELL/WAIT points with indicator)

Eğitim veri seti için grafik üzerinde geliştirilen indikatörlerle uygun noktalar seçilerek belirlenen AL, SAT ve BEKLE durumları kaydedilir. Bu verilerin Bayes ile sınıflandırmanın yapıldığı C#.NET dili ile geliştirilen yazılımda kullanılabilmesi için Metatrader platformundan CSV formatında gönderilerek MSSQL veritabanına kaydı yapılmaktadır. CSV formatı Şekil 5'te gösterildiği gibi bir para birimi için, uygun AL/SAT/BEKLE noktası değerleri ile tarih ve saat verisinden oluşmaktadır:

1	date, time
2	2016.11.18,17:05
3	2016.11.18,18:37
4	2016.11.18,20:26

Şekil 5. CSV formatında alınan AL Noktası veri örneği (BUY Point data sample taken in CSV format)

ADIM 2: Robotun Eğitimi İçin Belirlenen Noktaların İndikatör Değerlerinin Alınması

Robotun eğitimi için AL/SAT/BEKLE nokta değerleri kaydedildikten sonra belirlenen tarih aralığında kullanılacak olan indikatör verileri alınmaktadır. Alınan indikatör verilerin fonksiyonları Şekil 6'da gösterilmiştir:

```

h_macd=iMACD(Symbol(),Period(),FastMACD,SlowMACD,MACDSMA,MACDprice);
h_stoh=iStochastic(Symbol(),Period(),SOPeriodK,SOPeriodD,SOslowing,SOfmethod,SOfpricefield);
h_rsi=iRSI(Symbol(),Period(),RSIPeriod,RSIprice);
h_cci=iCCI(Symbol(),Period(),CCIPeriod,CCIprice);
h_adx = iADX(Symbol(),Period(),14);
h_Momentum = iMomentum(Symbol(),Period(),14,PRICE_CLOSE);

```

Şekil 6. İndikatör verisi için kullanılan fonksiyonlar ve örnek kullanım formatı (Functions and example usage format used for indicator data)

Fonksiyonların çalıştırılması ile elde edilen indikatör verileri robotun eğitiminde kullanılmak için veritabanına Şekil 7'deki gibi yazılmaktadır:

Gelen_id	zaman	macd1_buf...	macd2_buffer	stoh_buffer	rsi_buffer	adx_buffer	adx_DI_arti_b...
167129	201601292359	-0,00010415	-6,478E-05	17,17171717	30,79178781	29,6694275	9,89428597
167130	201602010000	-0,00011033	-7,409E-05	24,52830189	29,91677003	32,35184247	8,57504784
167131	201602010001	-9,875E-05	-8,053E-05	46,2962963	45,70265275	29,79624077	17,0043577
167132	201602010002	-8,696E-05	-8,467E-05	64,54545455	47,05455243	27,58138596	14,73711001
167133	201602010003	-8,471E-05	-8,783E-05	71,79487179	41,49187811	28,83479054	12,77216201
167134	201602010004	-7,639E-05	-8,939E-05	70,94017094	46,27934729	29,9210745	11,06920707
167135	201602010005	-6,422E-05	-8,925E-05	73,5042735	50,05199194	26,73519182	18,48220168
167136	201602010006	-5,396E-05	-8,625E-05	82,29166667	50,05199194	25,57325382	26,01790813
167137	201602010007	-4,53E-05	-8,053E-05	86,66666667	50,05199194	24,56624089	22,54885371
167138	201602010008	-4,039E-05	-7,345E-05	77,77777778	47,94913628	23,40497046	19,54233988
167139	201602010009	-3,688E-05	-6,528E-05	66,66666667	47,23672417	25,18987241	16,93669456
167140	201602010010	-3,132E-05	-5,779E-05	55,26315789	49,65344351	24,44740031	21,34513529
167141	201602010011	-2,262E-05	-5,064E-05	62,06896552	53,4780423	22,15392282	31,83245058
167142	201602010012	-1,554E-05	-4,296E-05	78,57142857	53,4780423	21,9881794	36,47701273
167143	201602010013	-7,43E-06	-3,53E-05	93,75	55,81377748	20,25639014	31,61341103
167144	201602010014	-4,18E-06	-2,862E-05	76,31578947	52,06060719	19,99390345	33,11257527
167145	201602010015	4E-06	-2,218E-05	79,48717949	57,45263645	19,29913439	28,69756524

Şekil 7. İndikatör fonksiyonlarından alınan verilerin yazılması (Writing data from indicator functions)

ADIM 3: Robotun Eğitilmesi

Şekil 7'deki gibi zaman ve indikatör verileri elde edildikten sonra Şekil 5'deki gibi elde edilen AL, SAT ve BEKLE noktalarına göre robot eğitilir. Örneğin; 2016.11.10 15:30 zamanlı AL noktası için indikatörlerden kaydedilen değerlere göre Şekil 7'deki indikatör verileri AL, SAT ve BEKLE noktaları için ayrı ayrı yapılmaktadır. AL, SAT, BEKLE durumları için tabloya yazılan indikatör değerine göre robot eğitilmektedir.

ADIM 4: Aktif İndikatör Verileri ile Sınıflandırmanın Yapılması ve Sinyalin Belirlenmesi

Robotun eğitilmesi bittikten sonra Metatrader üzerinde çalışan Uzman Danışman isimli script anlık olarak indikatör verilerini alıp CSV formatında yazarak robota göndermekte ve robot gelen bu verinin AL, SAT ya da BEKLE durumlarından hangisine girdiğini Bayes ile yapılan sınıflandırmaya göre belirlemektedir. Sınıflandırmanın yapılmasını sağlayan fonksiyonun çalıştırılma örneği Şekil 8'deki gibi gösterilmiştir:

```
classifier.Classify(new double[] { -0.00011510, -0.00003182, 27.23214286,
45.20166208, -65.21739130, -37012.60767712, 31.00672028, 14.03653509,
30.93492578, -34.84124122, 0.25603865, 99.94576108, -0.00008328,
-0.27763496, -0.24939989, -0.00000425, -0.00005359, -0.00055359, 0.00029286
});
```

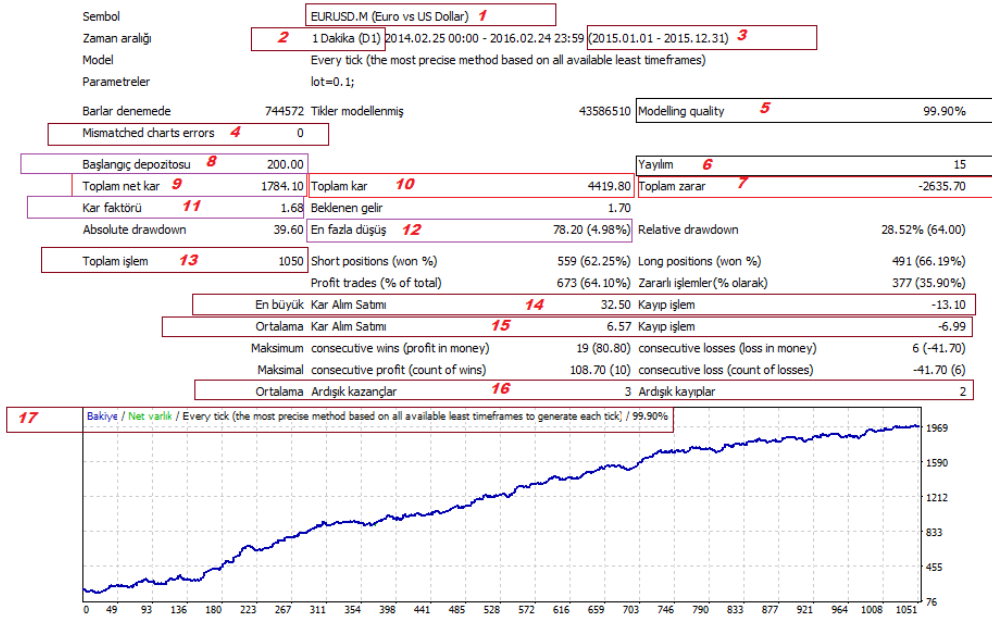
Şekil 8. İndikatör verilerinin sınıflandırılmasını yapan fonksiyon çalıştırılması (Running the function that classifies the indicator data)

ADIM 5: Robottan Alınan Değerlere Göre İşlem Açılması

Aktif indikatör değerlerine yazılımda yapılan sınıflandırma sonucu CSV formatında dönen AL, SAT ya da BEKLE sinyali doğrultusunda mevcut serbest bakiye miktarı ile aktif pozisyonların kâr/zarar durumları dikkate alınarak Metatrader ortamındaki Uzman Danışmanın işlem yapması sağlanmaktadır. AL ya da SAT yönünde işlem açıldıktan sonra işleme giriş fiyatında belli bir oranda yükseliş gerçekleştiğinde pozisyon kapatılarak "Take Profit (kâr al)" ya da belli bir düşüş gerçekleştiğinde "Stop Loss (zarar durdur)" işlemi gerçekleştirilerek pozisyonlar kapatılabilmektedir.

4.3. Geliştirilen Robotun Forex Verileri Üzerinde Test Edilmesi (Testing the developed robot on Forex data)

Geliştirilen yöntem, 200 dolarlık başlangıç depozitosu ile 01.01.2015 – 31.12.2015 tarihleri arasındaki EUR/USD, GBP/USD, USD/JPY, USD/CHF, USD/CAD, GBP/JPY ve AUD/USD paritelerine ait 1 dakikalık(D1) grafik verileri üzerinde Metatrader 4 platformu kullanılarak backtest(geçmiş verilere yönelik test) yöntemi ile test edilmiştir. Örnek olması açısından EUR/USD paritesine ait elde edilen backtest sonuç ekranı Şekil 9'daki gibi gösterilmiş ve ekran üzerindeki terimler açıklanmıştır. Pariteler üzerinde yapılan test sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 9. Yönteme uygulanan backtest sonuç ekranı (Backtest result screen applied to the method)

Yapılan test sonucunda ortaya çıkan grafikte gösterilen terimler aşağıdaki gibi açıklanmıştır;

- 1- Testin Yapıldığı parite (EUR/USD)
- 2- Testin uygulandığı zaman veri serisi (D1 – 1 dakikalık grafikte test yapılmıştır)
- 3- Testin yapıldığı tarih aralığı
- 4- Test sırasında karşılaşılan hatalar (Başarılı bir backtest için Mismatched charts errors=0 olması gerekmektedir)
- 5- Backtestin geçerlilik oranı
- 6- Robotun test edildiği aracı Forex firmasının işlemlerde uyguladığı alış/satış farkı(spread) değeri
- 7- Testin uygulandığı tarih aralığında edilen toplam zarar miktarı
- 8- Başlangıç depozito miktarı
- 9- Elde edilen toplam net kâr (Test boyunca elde edilen toplam kârdan, toplam zarar çıktıktan sonra kalan kısım)
- 10- Testin uygulandığı tarih aralığında edilen toplam kâr miktarı
- 11- Kâr faktörü (toplam kârın toplam zarara bölünmesi sonucu çıkan oran)
- 12- En fazla düşüş (Sistem test edilirken gerçekleşen arka arkaya gelen zararlar ve gerçekleşen en fazla düşüşü göstermektedir. Bu tarih sürecinde 4.419 dolar kazanana kadar 78,20 dolarlık bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu da %4,98’lik bir geri çekilmeyi ifade etmektedir.)
- 13- Açılan toplam işlem adedi
- 14- Gerçekleşen en büyük kâr ve en büyük zarar miktarları
- 15- Gerçekleşen ortalama kâr ve ortalama zarar miktarları
- 16- Ortalama ardışık kazanç ve ardışık kayıplar
- 17- Backtestin grafiksel gösterimi

200 dolarlık başlangıç depozitosu ile bir yıl boyunca elde edilen 1 dakikalık(D1) EUR/USD paritesine ait grafik verisi üzerinde yapılan backtest boyunca sistem 1050 adet işleme girmiş ve bu işlemlerde hata ile karşılaşmamıştır. Yapılan bu işlemler sonucunda toplamda 4.419,8 dolarlık kârlı, 2.635,7 dolarlık zararlı işlem gerçekleştirilerek 1,68’lik kâr faktörü ile net 1.784,1 dolar kâr elde etmiştir.

Tablo 3. Paritelere uygulanan test sonuçları (Test results applied to parities)

Parite	Toplam Kâr(\$)	Toplam Zarar(\$)	Net Kâr(\$)	Kâr Faktörü	En Fazla Düşüş(%)
EUR/USD	4.419,80	2.635,70	1.784,10	1,68	4,98
GBP/USD	3.178,30	1.974,10	1.204,20	1,61	5,03
USD/CHF	3.487,70	2.221,40	1.266,30	1,57	7,10
USD/JPY	2.873,50	1.928,50	945,00	1,49	5,23
USD/CAD	2.420,10	1.522,10	898,00	1,59	4,10
GBP/JPY	2.801,90	2.296,60	505,30	1,22	8,10
AUD/USD	1.909,20	1.231,70	677,50	1,55	5,17

Yapılan backtest sonrası elde edilen sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen robotun tüm pariteler üzerinde toplamda kâr elde ettiği görülmüştür. Forex piyasalarında açık pozisyonların toplam zararı izin verilen sınırı aştığında aktif pozisyonlar otomatik olarak o anki kâr/zarar durumu ile kapatılarak hesabın işlemleri sonlandırılmaktadır. Yani burada zarardaki işlemler için sınırsız bir bekleme söz konusu değildir. Robotun verimli olduğunun anlaşılması için en önemli kriter toplam kârın toplam zarara oranı olan kâr faktörüdür. Kâr faktörü ne kadar yüksek ise robot o kadar başarılıdır. Bir diğer önemli kriter ise işlem yapılırken gerçekleşen zararlar ile yaşanan geri çekilmedir (en fazla düşüş). Geri çekilme ne kadar küçük ise robot o kadar başarılıdır. Tabloya bakıldığında robot en yüksek kâr faktörünü (1,68) ve en düşük geri çekilmeyi (%4,98) EUR/USD paritesinde elde etmiştir. EUR/USD'nin Forex piyasalarında en çok işlem yapılan parite olması sayesinde bu pariteye ait verilerden elde edilen sinyallerin netlik oranının yüksek olması, robotun EUR/USD üzerinde en başarılı değerlere ulaşmasında etkili olmaktadır. AUD/USD ya da GBP/JPY gibi daha seyrek işlem yapılan paritelerde sinyallerin yönü gün içinde çokça değiştiği için robotun başarısı ve test sonucunda elde edilen kâr oranları diğer yüksek hacimli paritelere göre daha az olmaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Günlük ortalama 5,5 trilyon dolarlık işlem hacmiyle devasa bir piyasa olan Forex'teki işlemlerin insan eliyle yapılması ve takip edilmesi giderek zorlaşmaktadır. Forex'in devasa yapısından dolayı bu piyasadaki fiyat analizleri birçok bilim adamı ve piyasa oyuncusunun dikkatini çekmektedir. Yatırımcıların fiyat tahmini yapma konusunda ciddi bir karar destek sistemine ihtiyacı olduğu görülmüştür. Yatırımcılar bu büyük veri içerisinden ihtiyaç duydukları tahminlere ancak profesyonel analizler ve bu analizler ışığında çeşitli yapay zekâ teknikleri ile geliştirilmiş otomatik AL/SAT sinyali üretebilen karar destek sistemleri ile ulaşabilmektedirler.

Bu çalışmada veri madenciliği sınıflandırma teknikleri arasında yer alan ve bir makine öğrenme algoritması olan Naive Bayes ile geçmiş fiyat zaman serisi ve formasyonlarından yararlanarak gelecekteki fiyat hareketleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Söz konusu tahmin için C#.NET ve MQL dili kullanılarak Metatrader platformu üzerinde bir robot geliştirilmiştir. Geliştirilen robotun işlem performansı ve kârlılığını ölçmek amacıyla, robota EUR/USD, GBP/USD, USD/JPY, USD/CHF, USD/CAD, GBP/JPY ve AUD/USD paritelerine ait 01.01.2015 – 31.12.2015 tarihleri arasındaki veriler üzerinde backtest yöntemi uygulanmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde geliştirilen robotun, Forex piyasalarında alım-satım işlemleri için ileriye yönelik fiyat tahmininde bulunarak başarılı sinyaller ürettiği ve testin uygulandığı tüm paritelerde toplamda kâr elde ettiği görülmüştür. Robotun en iyi performans gösterdiği EUR/USD paritesindeki 1,68'lik kâr faktörü ve %4,98'lik geri çekilme oranı ile kârlılık açısından gelecek vadeden sonuçlara ulaştığı değerlendirilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Alpaydın, E., 2004. Introduction to Machine Learning. The MIT Press, London.
- Baasher, A.A., Fakhr, M.W., 2011. Forex Trend Classification Using Machine Learning Techniques. Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, 1(1), 41-47.
- Brock, W., Lakonishok, J., LeBaron, B., 1992. Simple Technical Trading Rules and The Stochastic Properties of Stock Returns. The Journal of Finance, 47(5), 1731-1764.
- Cao, D.Z., Pang, S.L., Bai, Y.H., 2005. Forecasting Exchange Rate Using Support Vector Machines. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 3448-3452.
- Celik, O., Osmanoglu, U. O., Canakci, B., 2020. Sentiment Analysis From Social Media Comments. Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 366-374.
- Dalyan, T., 2006. Makine Öğrenmesinde 1R Algoritması ve İkinci Kuralın (2R) Oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye.
- Guliyev, E., Gurbanzade, Ş., 2008. Forex A'dan Z'ye Uluslararası Döviz Piyasası Alfabeti, Mega Basım, İstanbul.
- Ickes, B.W., 2006. The Foreign Exchange Market. Econ Papers, 434.
- InvestAZ, 2017. Forex İndikatörleri Nelerdir?. Çevrimiçi (Erişim, 2 Nisan 2018): <https://www.investaz.com.tr/blog/forex-indikatorleri-nelerdir>
- Kırbaş, İ., Arslan, K., 2020. Kapalı Alan Konumlandırma Sistemleri için Düğüm Prototipi Geliştirme. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 612-624.
- Meydan, M., 2008. Forex Piyasası Uluslararası Döviz Piyasalarında İnternet Üzerinden İşlem. Elma Yayınevi, İstanbul.
- Murat, N., 2007. Model Seçiminde Bayesci Yaklaşımların Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Türkiye.

- Seifollahi, S., Shajari, M., 2019. Word sense disambiguation application in sentiment analysis of news headlines: an applied approach to FOREX market prediction. *Journal of Intelligent Information Systems*, 52, 57-83.
- Silahtaroglu, G., 2008. Kavram ve Algoritmalarıyla Temel Veri Madenciliği. Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Uzun, Y., 2005. Tıbbi Veriler Üzerinde Makine Öğrenme Algoritmaları ve Bulanık Mantık ile Kurallar Öğrenme. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Türkiye.
- Vyklyuk, Y., Vukovic, D., Jovanovic A., 2013. Forex prediction with neural network: USD/EUR currency pair. *Actual Problems of Economics*, 10(148), 261-273.
- Weiss, S.M., Indurkha, N., 1998. *Predictive Data Mining: A Practical Guide*. Morgan Kaufmann Publications, USA.
- Witten, I.H, Frank, E., 2005. *Practical Machine Learning Tools and Techniques Second Edition*. Morgan Kaufmann Publications, USA.
- Yao, J., Tan, C.L., 2000. A Case Study on Using Neural Networks to Perform Technical Forecasting of Forex. *Neurocomputing*, 34(1-4), 79-98.



YEŞİL SATIN ALMA VE YEŞİL TEDARİKÇİ SEÇİMİ: BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA

Ayberk SOYER*, Aybala Beste TÜRKAY

İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34357, Maçka/İstanbul

Anahtar Kelimeler

*Yeşil Satın Alma,
Yeşil Tedarikçi Seçimi,
Analitik Ağ Süreci,
Karar Verme.*

Öz

Teknolojinin artan bir hızla gelişmesi, günümüzde işletmelerin daha fazla çeşit ve miktarda ürünü, daha kısa sürelerde pazara sunabilmelerine imkân sağlamaktadır. Bu durum rekabet avantajı elde etmek isteyen işletmeler için bir fırsat yaratmakla beraber, arz miktarlarındaki yüksek artış oranlarına karşılık taleplerin aynı oranda artmaması ve tüketicilerin daha bilinçli ve duyarlı hale gelmeleri, bu işletmeleri yoğun bir rekabet ortamı içerisine sokmaktadır. Doğal kaynakların hızla tükenmesi, iklim değişikliği, çevre kirliliğinin artması, vb. durumların yarattığı olumsuz etkiler sebebiyle toplumdaki farkındalığın artması ve tüketicilerin daha çevreci ürünleri tercih etmeleri, medyanın ve sivil toplum kuruluşlarının çevresel konulara gösterdiği hassasiyet, genel ve yerel otoriteler tarafından yapılan düzenlemeler, vb. koşullar, işletmeleri ürün yaşam döngüsü boyunca tüm aşamalarda çevreye duyarlı olmaya zorlamaktadır. Bu duyarlılık, üretimde kullanılan her türlü kaynağın azaltılmasını, üretim süreçlerinin çevreyle dost olacak şekilde yapılandırılmasını, kullanılan ambalaj malzemelerinin ve taşıma yöntemlerinin çevreyle dost olması ve yeniden kullanım konusunda gerekli adımların atılmasını gerektirmektedir. Bu noktada ürün yaşam döngüsünün ilk aşaması olan satın alma konusunda önemli iyileştirme potansiyeli bulunmakta ve üretimde kullanılacak her türlü girdinin temini için en uygun tedarikçinin seçimi en önemli aşamalardan biri haline gelmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında yapılan bu çalışma ile amaçlanan, satın alma süreçlerinde geleneksel tedarikçi seçimi yerine, yeşil tedarikçi seçim süreçlerinin araştırılması ve yeşil tedarikçi seçiminde kullanılabilecek kriterlerin belirlenmesidir. Yapılan araştırmalardan hareketle yeşil tedarikçi seçimi için yeni bir karar verme modeli geliştirilmiş ve Türkiye ve Avrupa pazarında önemli bir paya sahip beyaz eşya üreticilerinden biri için tedarikçi seçimi süreci bir vaka analizi ile somutlaştırılmıştır.

GREEN PURCHASING AND GREEN SUPPLIER SELECTION: AN APPLICATION IN THE WHITE GOODS SECTOR

Keywords

*Green Purchasing,
Green Supplier Selection,
Analytic Network Process,
Decision Making.*

Abstract

The increasing speed of technological advancement in recent years, allows companies to offer more varieties and quantities of products to the market in shorter periods. While this creates an opportunity for the companies that want to gain competitive advantage, the fact that the demands do not increase at the same rate with supply and the consumers become more conscious and sensitive, puts these companies in an intense competitive environment. Due to the negative effects of climate change, the rapid depletion of natural resources, increased environmental pollution, etc., environmental awareness in the society increases. As a result, majority of the consumers tend to prefer more environmentally friendly products, the media and non-governmental organizations become more sensitive to environmental issues, and governments put more regulations on environmental protection. All these conditions force companies to be environmentally conscious at all stages throughout the product life cycle, which, in turn, means taking the necessary steps to reduce all kinds of resources used in production, reconfiguring the production processes, using environmentally friendly packaging materials and transportation methods and considering reuse issues. At this point, there is a

* İlgili yazar / Corresponding author: ayberk@itu.edu.tr, +90-212-293-1300

significant improvement potential in purchasing process, which is the first stage of the product life cycle, and the selection of the most suitable supplier becomes one of the most important issues. For this reason, this study aims to propose a decision making model for green supplier selection to apply this model in one of the biggest white goods manufacturers in Turkey.

Alıntı / Cite

Soyer, A., Türkay, A.B., (2020). , Yeşil Satın Alma ve Yeşil Tedarikçi Seçimi: Beyaz Eşya Sektöründe Bir Uygulama, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1202-1222.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Soyer, 0000-0002-4429-3525

A.B. Türkay, 0000-0001-8240-1817

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date

19.03.2020

Kabul Tarihi / Accepted Date

21.12.2020

Yayın Tarihi / Published Date

25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda, dünya üzerindeki toplam talebin çok üzerinde üretim yapıyor olması, üreticiler açısından sorun olmaya başlamıştır. Üretimden pazarlamaya her alanda rekabet hız kazanmıştır. Üstelik tüketicilerin, satın aldıkları ürünlerin kalitesi ve çevresel boyutları konularında artık çok daha duyarlı olması durumu, üreticiler tarafından mutlaka göz önüne alınması gereken bir konu haline gelmiştir. Mal ve hizmet üreticileri varlıklarını sürdürebilmek ve kendilerinden beklenenleri karşılayabilmek için doğru stratejiler geliştirerek, kendilerini bu dar boğazdan kurtarmak zorundadır. Bu noktada artan beklentilerden en önemlisi çevre duyarlılığıdır. Artık tüketiciler beklenti ve ihtiyaçlarının en üst düzeyde karşılanmasının yanı sıra, kendilerine ve çevreye değer verilmesini ve saygı gösterilmesini beklemektedir. Önceleri tüketicilerin ihtiyaçlarına cevap verebilmek için iş süreçlerini, iş yüklerini azaltacak, kaliteyi artıracak ve maliyetleri düşürerek karlılığı artıracak şekilde düzenleyen şirketler, istenen hedef pazarlara ulaşabilmek, sistemi daha verimli kılabilmek ve rekabet üstünlüğü sağlayabilmek amacıyla son yıllarda tedarik zincirine yönelmişlerdir.

Özellikle son yüzyılda yaşanan teknolojik gelişmeler, insan hayatı üzerinde birçok yönden olumlu etkilere sahip olsa da, aynı zamanda doğal kaynakların tükenmesini hızlandırmış ve çevre kirliliğinin artmasına sebep olmuştur. Bu negatif sonuçların toplumdaki yansımaları yalnızca canlıların sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerle sınırlı kalmamış, şirketler için var olan kaynakların daha etkin kullanımını ve yeni kaynak arayışlarını zorunlu kılmıştır. Bu zorunluluğun bir sonucu olarak da, konuya ilişkin çeşitli yasal düzenlemelerin yapılması ihtiyacı oluşmuştur. Günümüzde tüketiciler; aldıkları ürün ve hizmetlerin çevreye duyarlı süreçlerle üretilmesini, üreticilerin daha fazla geri dönüşüm imkânı sağlamasını, üretimde doğal kaynak kullanımının en aza indirgenerek yenilenebilir enerji kullanımının sağlanmasını ve nihai ürünlerin çevreyle dost ürünler olmasını beklemektedirler. Bu durum organizasyonları, kendilerini bu konularda geliştirmeye zorlamaktadır.

Özellikle son 30 yılda yaşanan gelişmelerin de katkısıyla, dünya üzerindeki toplam talebin çok üzerinde üretim yapıyor olması sebebiyle, şirketlerin doğru stratejiler geliştirmemeleri ve müşteri beklentilerini karşılamamaları durumunda, rekabetten koparak pazar payı kaybetmeleri kaçınılmaz bir son haline gelmektedir. Bu bağlamda, müşterilerin çevreye yönelik beklentilerini karşılamak için 'çevreye duyarlı organizasyon' kavramı ortaya çıkmıştır. Çevreye duyarlılık, organizasyonların tüm faaliyetlerinde çevreyi dikkate alan, çevreye verilen zararı en aza indiren, üretim süreçlerini değiştiren, çalışanlarını çevre duyarlılığı konusunda eğiten, temiz teknolojileri kullanan, ekolojik çevrenin korunması için yeni projeler gerçekleştirmeyi ön planda tutan bir anlayıştır. Bütün bu amaçları gerçekleştirmek için, şirket yöneticilerinin alacakları kararların çevresel etkilerini gözeten ve bu kararlara ilişkin uygulamaların çevre açısından uygun sistem ve süreçlerle yapılmasını sağlayan bir "Çevre Yönetim Sistemi" kurmaları gerekmektedir (İstanbul Sanayi Odası, 2002). Çevre Yönetim Sistemi, bir organizasyonun önemli ve öncelikli olarak tanımlanan çevresel etkilerinin kontrol altına alınması, azaltılması ve tamamen ortadan kaldırılması için belirlediği çevresel hedeflere, sistematik bir biçimde ulaşma çabası olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışma kapsamında, organizasyonlar için rekabet üstünlüğü elde etmek ve varlıklarını sürdürebilmek için kritik öneme sahip olan yeşil tedarik zinciri konusunun alt başlıklarından biri ve aslında temel bileşeni olan yeşil satın alma ve yeşil tedarikçi seçimi konuları incelenecek; satın alma süreçlerinde geleneksel tedarikçi seçimi yerine kullanımı yaygınlaşmaya başlayan yeşil tedarikçi seçim süreçleri araştırılarak, yeşil tedarikçi seçiminde etkili olan kriterler belirlenecektir. Bu amaçla, öncelikle konuya ilişkin literatür taraması sonuçları, kavram tanımları ve kurulan modellere yer verilecek, daha sonra yapılan araştırmalar ve uzman görüşleri doğrultusunda oluşturulan yeşil tedarikçi seçim modeli paylaşılacak, son olarak da bu modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla Türkiye ve Avrupa pazarında çok önemli bir paya sahip beyaz eşya üreticilerinden biri için gerçekleştirilen uygulamanın sonuçları aktarılacaktır.

2. Tedarik zinciri kavramı (Supply chain concept)

Tedarik zinciri kavramı farklı araştırmacılar tarafından farklı zamanlarda farklı şekillerde tanımlanmıştır. Min ve Galle (1997), 90'lı yılların sonlarında tedarik zincirini; daha az kaynak kullanımı ve atıkların yönetilmesi şeklinde tanımlarken, Gavronski vd. (2011)'nin tedarik zinciri tanımı, ürün yaşam döngüsü analizleri, kirliliği önleme ve kontrol ile çevre yönetim sistemi konularını kapsayan yönetim sistemi şeklinde olmuştur. Bir başka araştırmada ürün yaşam döngüsü analizleri, çevresel tasarımlar, geri dönüşüm, yeniden kullanım ve kaynak azaltılması (Yen ve Yen, 2012) şeklinde tanımlanan tedarik zincirinin en kapsamlı tanımlamalarından biri Oluğu vd. (2011) tarafından; yeşil satın alma, yeşil üretim, yeşil malzeme yönetimi, yeşil dağıtım, yeşil pazarlama ve tersine lojistik kavramlarının bütünü şeklinde yapılmıştır. Tanımlamalardaki bu farklılıkların temel nedeni zamanla yaşanan gelişmelere paralel olarak tedarik zinciri kapsamının genişlemek zorunda kalmasıdır.

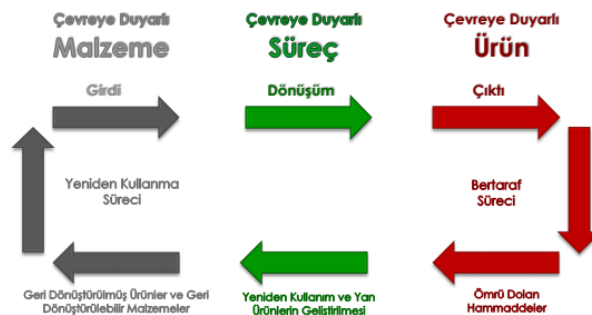
Endüstri devrimi ile başlayan ve giderek artan bir hızla gelişen teknoloji; birçok açıdan hayatımızı kolaylaştırır da teknolojik gelişmelere paralel şekilde artan endüstrileşmenin çevre üzerindeki zararlı etkileri de göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşmıştır. Çevre kirliliği endüstri devriminden bu yana toplumu ilgilendiren önemli sorunlardan biridir. Tedarik zinciri ise 20. yüzyılın başlarından itibaren yönetsel açıdan araştırmacıların ilgisini çeken bir konudur. Bu iki konunun ortak bir paydada buluşması ise çok eskilere dayanmamaktadır. Sarkis vd. (2011) modern tedarik zincirinin ilk uygulamaları olarak yalın üretim ve tam zamanında üretimi işaret etmektedir. Bu uygulamalar operasyonel etkinliği arttırmak ve atıkları azaltmak üzerine çalışmaktadır. Fakat araştırmacılar bu çalışmalarda atık azaltma çalışmalarının amacının çevresel duyarlılık değil, yalnızca ekonomik fayda olduğuna dikkat çekmektedir.

1960'lı yıllara gelindiğinde Rachel Carson tarafından yayınlanan ve DDT kullanımının kuşlar ve insanlar üzerindeki etkilerini inceleyen Silent Spring kitabı ile Amerika'da çevresel hareketlenme başlamıştır. Bu hareketlenmenin bir sonucu olarak Çevre Koruma Örgütü (EPA: Environmental Protection Agency) kurulmuştur. 1970'li yıllarda ise malzemelerin satın alınması ile başlayıp üretimin sonlanarak ürünlerin müşterilere ulaşmasına kadar geçen sürenin topluca değerlendirilmesine yönelik faaliyetler üzerine çalışılmaya başlanmıştır. 1980'li yıllarda bu durum "ürün yaşam döngüsü" olarak adlandırılmış ve değerlendirilmiştir. Satın alma, lojistik ve ters lojistik faaliyetlerinin çevresel bakış açısıyla incelenmesi ise ancak 1990'lı yıllarda görülmeye başlamıştır. Bu nedenle bu alandaki ilk araştırmalar da bu tarihlere rastlamaktadır (Sarkis vd., 2011).

Özellikle son 25 yılda doğal kaynakların ve çevrenin korunması uluslararası boyuta taşınmıştır. Günümüzde firmalar sundukları hizmetlerin ya da ürünlerin hayat eğrilerinin her aşamasında sadece ekonomik değer yaratmasını yeterli görmemekte, bunun yanında ekolojik değer de yaratmasını sağlamaya çalışmaktadır (Büyüközkan ve Vardaloğlu, y.y.). Bu durumun bir sonucu olarak yeşil satın alma, yeşil üretim, yeniden üretim, yeniden kullanım, geri dönüşüm, tersine lojistik gibi "yeşil uygulamalar" ortaya çıkmıştır. Tüm bu uygulamaları "Yeşil Tedarik Zinciri" tanımı altında toplamak uygun olacaktır.

2.1. Yeşil tedarik zinciri (Green supply chain)

Yeşil tedarik zinciri; tedarik sürecinin tüm aşamalarında çevreci süreçleri esas alan yönetsel bir anlayışa sahiptir. Malzeme tedarik işleminin doğal kaynaklara zarar verilmenden ya da mümkün olan en az zararla yapılmasını, üretim sürecinde enerjinin verimli kullanımını, süreçlerin iyileştirilmesi ile temiz üretim uygulamalarını, üretim sırasında açığa çıkan atıkların azaltılmasını ve çevreye en az zarar verecek şekilde yok edilmesini, çevreye duyarlı ürünler üretilmesini, bu ürünlerin en uygun lojistik ağlarla taşınmasını ilke edinen bir yönetim sistemidir. Yeşil tedarik zincirini özetleyen süreç akışı Şekil 1'de verilmiştir.



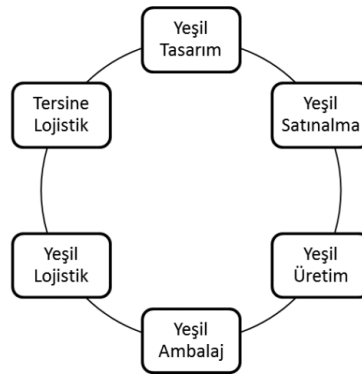
Şekil 1. Yeşil tedarik zinciri süreci (Green supply chain process)

Gerek bireysel gerekse de kurumsal hayatta yaşanan değişiklik ve gelişimler genellikle ihtiyaçlardan kaynaklanmaktadır. Geleneksel tedarik zinciri anlayışından, yeşil tedarik zinciri anlayışına geçiş de belirli ihtiyaçlar sonucu ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Ekosistemdeki bozulmalar
- Yasal düzenlemeler
- Müşteri talepleri
- Artan rekabet
- Rekabette avantaj sağlama isteği
- Atık yönetimi ile maliyet düşüşü sağlama
- Ürün yaşam döngülerinin kısalması
- Paydaşların talepleri
- Şirket politikaları
- Artan tüketici duyarlılığı
- Sürdürülebilir gelişme (Min ve Galle, 1997, 2001; Gavronski vd, 2011; Olugu, Wong ve Shaharoun, 2011; Sarkis, Zhu ve Lai, 2011; Yen ve Yen, 2012)

Dünyada bu gelişmeler yaşanırken üreticiler bu değişime duyarsız kalamamış ve sonuçta hem üreticiler hem de akademisyenler bu etkileri ortadan kaldırmak üzere çalışmalar yapmaya başlamıştır. Araştırmacılar tedarik zinciri faaliyetlerinden kaynaklanan atık ve emisyonların küresel ısınma ve asit yağmuru gibi çevresel sorunların temel kaynağı olduğuna dikkat çekmektedir. Yeşil tedarik zinciri kavramı özellikle son yıllarda yaygınlaşsa da, ortaya çıkışı 1990'lı yıllara kadar dayanmaktadır. Zaman içerisinde kavramın tanımı ve kapsamı değişmiş ve bugünkü anlayışa ulaşmıştır. Min ve Galle (1997), yeşil tedarik zinciri kavramını "*daha az kaynak kullanımı ve atıkların yönetilmesi*" şeklinde tanımlanmaktadır. Son dönemde yapılan araştırmalarda ise kavramın kapsamı oldukça genişlemiştir. Örneğin, Gavronski vd. (2011) yeşil tedarik zincirini "*çevreci tasarımlar, ürün yaşam döngüsü analizleri, kirliliği önleme ve kontrol, çevre yönetim sistemi gibi konuları kapsayan yönetsel uygulamalar*" şeklinde tanımlamaktadır. Aynı yıl gerçekleştirilen farklı bir araştırmada Yen ve Yen (2012) yeşil tedarik zincirini "*tedarik zinciri içindeki satın alma ana faaliyetlerini; ürün yaşam döngüsü analizleri, çevresel tasarımlar, geri dönüşüm, yeniden kullanım ve kaynak azaltılması konularını kapsayacak şekilde genişleten anlayış*" şeklinde tanımlamıştır. Olugu vd. (2011) ise kavramı "*yeşil satın alma, yeşil üretim, yeşil malzeme yönetimi, yeşil dağıtım, yeşil pazarlama ve geri taşıma faaliyetlerini*" içerecek şekilde daha geniş bir şekilde ele almıştır.

Bu araştırmalara göre zamanla kapsamı çok genişleyen yeşil tedarik zinciri kavramı; yeşil satın alma, yeşil üretim, yeşil dağıtım, yeşil ambalaj, atık yönetimi ve tersine lojistik alt başlıklarına ayrılmıştır. Tüm bu araştırmalardaki kavramlar ve tanımlar Şekil 2'deki gibi yeşil tedarik zincirinin alt başlıkları olarak özetlenebilir. Bu temel bileşenler, takip eden bölümlerde kısaca açıklanacaktır.



Şekil 2. Yeşil tedarik zinciri temel bileşenleri (Fundamental components of green supply chain)

2.1.1. Yeşil tasarım (Green design)

Yeşil tasarımın amacı ürünlerin olumsuz çevre etkilerinin azaltılmasını sağlayacak şekilde uygun malzeme ve teknolojiler kullanılarak üretilmesini sağlamaktır. Bu tanıma paralel olarak üreticilerden beklenen çevreyle dost malzemelerin kullanıldığı ürünler üretmeleri ve hem üretim sürecinde hem de nihai kullanıcının kullanım sonucunda meydana gelen olumsuz çevre etkilerini azaltacak tasarımlar yapmalarıdır. Bu tanımın detayları aşağıda özetlenmiştir:

- **Çevre etkisi daha az olan hammaddelerin kullanımı:** Toksik olmayan malzemeler, üretimleri için daha az enerji gerektiren geri dönüştürülmüş malzemeler

- **Enerji verimliliği:** Hem üretim sürecinde hem de nihai kullanıcının kullanımı sırasında daha az enerji gerektiren tasarımlar
- **Kalite ve dayanım:** Daha uzun ömürlü ve daha fonksiyonel ürünlerin tasarlanması ile ürünlerin kullanım sürelerinin arttırılması ve tüketimin azaltılmasının sağlanması
- **Yeniden kullanılabilir/Geri dönüştürülebilir ürünler:** Üretimde kullanılacak malzemelerin, ürünlerin kullanım ömürleri dolduğunda yeniden kullanılabilir ya da geri dönüştürülebilir malzemelerden seçilmesi
- **Karbon ayak izinin azaltılması:** Ürünlerin üretimi sırasında ve kullanımlarından kaynaklanacak karbon salınımlarının azaltılmasını sağlayacak şekilde ürün ve süreç tasarımlarının yapılması

2.1.2. Yeşil satın alma (Green purchasing)

Değişen küresel eğilimlere göre artık üreticiler üretimleri için satın almaları gereken malzemelerin kaliteli ve uygun fiyatlı olmasını göz önünde bulundurmakla yetinmeyip; tedarikçilerin ve ürünlerinin çevresel etkilerini de dikkate almak durumundadır. Bu gerekliliğin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan “yeşil satın alma” kavramı 2000’li yılların başlarından bu yana birçok araştırmaya konu olmuş ve birçok farklı araştırmacı bu kavrama farklı tanımlar getirmiştir. Yayınlanan iki farklı akademik çalışmada yeşil satın alma kavramı üretimde kullanılmak üzere satın alınacak malzemelerin geri dönüştürülebilir, yeniden kullanılabilir veya geri dönüşümü yapılmış malzemeler arasından seçilerek yapılması şeklinde tanımlanmıştır (Min ve Galle, 2001; Sarkis, 2001). Sarkis, 2003 yılında gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada, satın alınacak malzemelerde olduğu gibi üretimde kullanılacak teknolojilerin satın alınmasında da çevre duyarlılığının gözetilmesi gerektiğini savunmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde üretim sırasında daha az enerji kullanılması ve daha az atık oluşması mümkün olacaktır.

Yeşil satın alma uygulamalarında en önemli basamak tedarikçi seçimi ve yönetimidir (Sarkis, 2003; Zhu vd., 2010; Zhu ve Sarkis, 2004). Bir üretici için sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamasının ilk halkası tedarikçileridir. Bu nedenle eğer bir üretici süreçlerini ve ürünlerini çevreyle dost hale getirmeyi planlıyorsa, buna tedarikçi seçimi aşamasından başlamak durumundadır. Tedarikçi seçimi ile başlayan süreçte tedarikçilerin kalite ve çevre beklentilerine uygunlukları sorgulanmalı; iş ilişkilerinin devamında ise sorgulama ve denetimlerin sürekliliği sağlanmalıdır.

2.1.3. Yeşil üretim (Green manufacturing)

Yeşil üretim, çevreyle dost üretim süreçleri ve karlılık üzerine odaklanan bir iş stratejisidir. Yeşil üretimle çevreye dost üretim süreçleri oluşturulurken, uygulanan atık ve kaynakların azaltılması politikası sayesinde karlılık da artmaktadır. Yeşil üretim süreçleri temelde üretim sırasında açığa çıkan atıkların azaltılması veya geri dönüştürülmesi olarak algılanmaktadır. Fakat bu algı yalnızca buz dağının görünen kısmıdır. Bu konuda yapılan ilk araştırmalardan birinde yeşil üretim; üretim süreçlerinin ve teknolojilerinin atık veya hurdaları ortadan kaldıracak biçimde tasarlandığı, geliştirildiği ve uygulandığı süreçler olarak tanımlanmaktadır (Sarkis ve Rasheed, 1995). Gungor ve Gupta (1999) konuya daha geniş bir perspektiften bakmış ve yeşil üretimin; ürün yaşam döngüsünün her aşamasında çevre etkilerinin değerlendirilerek, ürün ve üretim süreçlerinin çevre etkilerinin istenilen düzeyde kalmasının sağlanabileceğini vurgulamıştır.

Aslında yeşil üretim, hem girdilerin hem de çıktılarının kontrol altına alınması ve iyileştirilmesi gereken bir süreci tanımlar. Bu açıdan bakıldığında yeşil üretimin birden fazla odak noktası bulunmaktadır. Öncelikle yalnızca atıkların azaltılması yeterli olmayıp, bunun yanı sıra emisyonların, atık suların ve iş kazalarının azaltılması da gerekmektedir. İkinci adım kaynak kullanımının azaltılmasına yönelik olmalıdır. Bu kapsamda hem üretim için gereken hammaddelerin azaltılması hem de üretim sürecinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gündeme gelecektir. Günümüzde doğal kaynakların hızla tükendiği gerçeği göz önüne alındığında, yeşil üretim süreçlerinin yaygınlaştırılması çalışmalarına daha fazla önem verilmesi gerekliliği kendiliğinden ortaya çıkmaktadır.

2.1.4. Yeşil ambalaj (Green packaging)

Ambalaj, içerisinde bulunan ürünü, ilgili ürünün yapısına ve şekline göre en iyi şekilde koruyan, ürünün temiz kalmasını sağlayan, taşınmasını kolaylaştıran ve aynı zamanda üzerinde ürün ile ilgili bilgileri bulduran bir malzemedir (ÇEVKO, y.y.). Yeşil ambalaj ise ambalajın bu işlevlerini yerine getirirken aynı zamanda çevreye dost, geri dönüştürülebilir ya da yeniden kullanılabilir malzemelerden üretilmesi şeklinde tanımlanabilir (Zhu vd., 2005, 2007); ayrıca, ürün özellik ve gerekliliklerine göre ambalaj malzemelerinin kullanımını en aza indirecek iyileştirmeler yapılmasını da kapsamaktadır (Sarkis, 2003). Örneğin ambalaj boyutlarında yapılacak iyileştirmeler ile ürünlerin taşınması sırasında kullanılacak nakliye araçlarına daha fazla ürünün sığması sağlanabilmektedir. Bu şekilde taşımadan kaynaklı emisyonların azaltılması mümkün olacaktır. Bu durum dolaylı yoldan taşıma maliyetlerinde de iyileşme sağlayacaktır (Sarkis, 2003).

2.1.5. Yeşil lojistik (Green logistics)

Bir ürün için temel lojistik faaliyetleri, ürünlerin üretimi için gerekli hammaddelerin temini ile başlar; üretim sonrasında paketleme, taşıma, depolama ve müşterilere ulaştırılması evreleri ile devam eder. Yeşil lojistik ise; lojistik faaliyetlerinin, çevreye en az zarar verecek şekilde tasarlanması, lojistik faaliyetler sonucu ortaya çıkan çevre etkilerinin ölçülmesi ve bu etkilerin en aza indirgenmeye çalışılması konuları ile ilgilenir. Ürünleri taşıyan aracın motoru ve kullandığı yakıt, taşıma sıklığı, taşıma mesafesi ve ambalaj malzemesinin karakteristiği yeşil lojistik faaliyetlerinin performansı üzerindeki en büyük etkenlerdir (Sarkis, 2003).

2.1.6. Tersine lojistik (Reverse logistics)

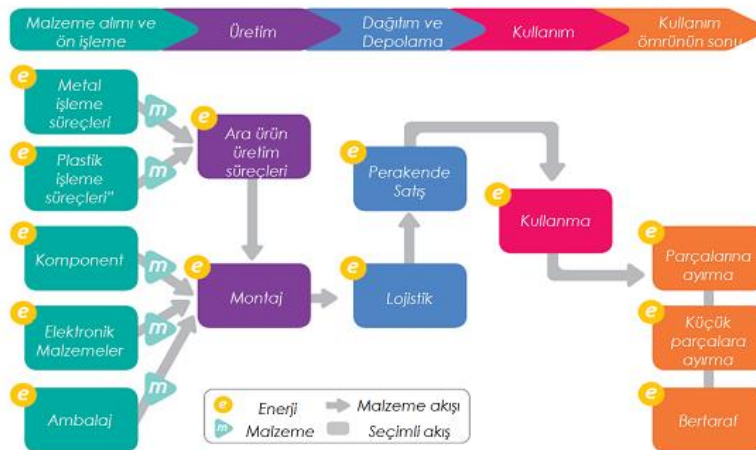
Tersine lojistik; hammadde, yarı mamul, bitmiş ürün ve bunlar hakkındaki bilgilerin tüketim noktasından üretim noktasına doğru, tekrar değer kazandırmak veya uygun şekilde yok edilmelerini sağlamak amacı ile etkin akışının planlanması, uygulanması ve kontrol edilmesi sürecidir. Ürünlerin tüketiciden üreticiye geri dönme nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- Ürünün arızalanması
- Ürünün zarar görmüş olması
- Ürünün ömrünün dolması
- Ürünün mevsimsel bir ürün olması nedeniyle artık kullanılmayacak veya satılmayacak olması
- Üründe ciddi hatalar olması
- Ürünün tehlikeli madde içermesi

Üreticiye dönen bu ürünler geri dönüşüm, yeniden kullanım veya yeniden üretim işlemlerine tabi tutulmakta ya da bertaraf edilmektedir. Geri dönüşüm, değerlendirilmesi mümkün atıkların çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerle ikincil hammaddeye dönüştürülerek tekrar üretim sürecine dahil edilmesidir. Yeniden kullanım, ömrünü tamamlamış bir ürünün çeşitli işlemler sonucu yeniden işler hale getirilmesi süreçlerini kapsar. Yeniden üretim, kullanılmış ürünlerin kontrol edilerek, özelliğini yitirmiş parçalarının orijinal ürünün özellikleri ve fonksiyonları korunacak şekilde yenileriyle değiştirilmesi ile aynı ürünün yeniden üretilmesi sürecidir (Ijomah vd., 2004). Bertaraf etme ise yok edilmesi gereken ürünlerin, ürünlere ait parçaların ve üretim esnasında oluşan zararlı atıkların çevreye zarar vermeden ortadan kaldırılması faaliyetleridir.

3. Yeşil Satın Alma Kavramı (Green Purchasing Concept)

Gelişen teknolojinin, insan yaşamına getirdiği kolaylıkların yanında ne yazık ki birçok yan etkisi de bulunmaktadır. Özellikle hızla artan sanayileşme ve şehirleşmenin sonucunda çevre kirliliği artmaktadır. Çeşitli kaynaklardan çıkan radyoaktif, katı, sıvı ve gaz halindeki kirletici maddelerin hava, su ve toprakta yüksek oranda birikmesi çevre kirliliği oluşmasına neden olmaktadır. Artan bu kirlilikle mücadelede tüm kesimler üzerine düşeni eksiksiz bir şekilde yapmalıdır. Son zamanlarda gerek kamuoyunun gerekse hükümetlerin bu konudaki bilinç ve duyarlılıkların artmasıyla kirliliğin azaltılması ve çevrenin korunması için ürün yaşam döngüsü boyunca (Bkz. Şekil 3) çeşitli önlemler ve yasal düzenlemeler tanımlanmıştır. Bu düzenlemeler özellikle çevre kirliliğinin artmasında büyük pay sahibi olan sanayileşmiş ülkelerin gündemlerinde ilk sıralarda yer almaktadır.



Şekil 3. Ürün yaşam döngüsü (Product life cycle)

Bu düzenlemeler sonrası farkındalığın yavaş yavaş artması ile yeşil satın alma faaliyetlerini rekabette üstünlük sağlamak için bir fırsat olarak görmeye başlayan yöneticiler, yeşil satın almayı satın alma stratejilerinin arasına eklemiştir. Bu ciddi kararda 1 Temmuz 2006 tarihinden itibaren piyasada yer alacak elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kurşun, cıva, kadmiyum, heksavalent krom gibi bazı kimyasalların kullanımını kısıtlayan bir tüzük olan “Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama Direktifi (RoHS: Restriction of Hazardous Substances Directive)”nin çıkarılmasının payı büyük olmuştur. Bu dönemden sonra birçok firma satın alma prosedürleri tanımlayarak ve tedarikçilerinin bu prosedürlere uymalarını sağlamaya çalışarak yasal yükümlülüklerini yerine getirmeyi amaçlamıştır. 2006 yılından sonra firmalar “neden yeşil” sorusunu sormayı bir kenara bırakıp, “nasıl yeşil” sorusunu sormaya başlamışlardır.

Bugünün koşullarında üreticiler artık tüm ürünleri için “beşikten mezara” çevresel uygunluklarını garanti altına almak durumundadır. Bu uyumluluğu sağlayabilmek için ilk adım ise satın almadır. Üretim için kullanılacak tüm ürün ve teknoloji girdilerinin satın alınması, nihai ürünün çevresel etkilerini büyük oranda etkileyecektir. Bu nedenle çevreci satın alma, bir ürünün çevresel etkilerinin azaltılmasında en önemli basamaktır. Literatürde ‘sürdürülebilir satın alma’, ‘çevreci satın alma’, ya da ‘yeşil satın alma’ olarak geçen bu kavram, bir ürünün temel işlevlerini yerine getirirken, aynı zamanda insan ve çevre sağlığı üzerindeki etkilerini azaltacak şekilde tasarlanması ve üretilmesini sağlayacak malzeme ve teknolojilerin satın alınması anlamına gelmektedir. Çevreci ürünler üretmek için, kullanılan kaynakların azaltılması, üretim süreçlerinin çevreyle dost olacak şekilde yapılandırılması, kullanılan ambalaj malzemelerinin ve taşıma yöntemlerinin çevreyle dost olması ve yeniden kullanım konusunda gerekli adımların atılması gibi iyileştirmeler yapılabilmektedir (Jorge vd., 2006).

Bu konularda araştırma yapan en önemli araştırmacılardan biri olan Sarkis (2003)’e göre yeşil satın alma; “*üretimde kullanılmak üzere satın alınacak malzemelerin geri dönüştürülebilir, yeniden kullanılabilir veya geri dönüşümü yapılmış malzemeler arasından seçilerek yapılması*”dır. Sarkis (2003), satın alınacak malzemeler gibi üretimde kullanılacak teknolojilerin satın alınmasında da çevre duyarlılığının gözetilmesi gerektiğini savunmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde üretim sırasında daha az enerji kullanılması ve daha az atık oluşması mümkün olacaktır. Literatürde yeşil satın alma üzerine yapılan akademik çalışmaların bir bölümü Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yeşil satın alma üzerine yapılan örnek araştırmalar (Sample research articles on green purchasing)

Araştırma	Araştırmanın Amacı	Yeşil Satın Alma Tanım	Neden?
Green vd. (1996)	Yeşil satın alma stratejileri belirleme	Kaynak kullanımı ve atıkların azaltılması	Artan farkındalık Ekosistem kalitesinin düşmesi
Noci (1997)	Tedarikçi değerlendirme sistemi geliştirme	Yeşil tedarikçi seçimi Tedarikçilerin ürün geliştirme süreçlerine dahil edilmesi	Sivil toplum örgütlerinin ve hükümetlerin artan baskısı
Min ve Galle (2001)	Amerika’daki yeşil satın alma uygulamalarını inceleme	Atıkları kaynağında azaltma Geri dönüşüm Yeniden değerlendirilebilen malzeme	Ekosistem kalitesinin azalması Artan farkındalık Müşteri talepleri
Warner ve Ryall (2001)	İngiltere hükümetinin yeşil satın alma politikalarının incelenmesi	Çevreye dost ürünlerin satın alınması	Sürdürülebilirlik Uzun vadede çevre etkilerinin azaltılması Yasal düzenlemelere uyum Pazar fırsatları İşçi sağlığı ve güvenliği maliyetlerinde azalma
Gavronski vd (2011)	İşletmelerin kendi kaynaklarını kullanarak yeşil ürünler üretmeleri için öneriler	Yeşil ürün üretebilmek için üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve tedarikçi katılımı	Ekosistemdeki bozulmalar Yasal düzenlemeler Müşteri ve çevre aktivistlerinin artan baskıları
Yen ve Yen (2012)	Yeşil satın alma kararında üst yönetimin rolü	Ürün yaşam döngüsü analizleri ışığında yapılan satın alma, geri dönüşüm, yeniden kullanım faaliyetlerin kapsayan satın alma Kaynak azaltma	Rekabet gücünü artırma Yasal düzenlemeler Toplum baskısı
Chiou vd (2011)	Firmaların yeşil tedarik zinciri uygulamalarına geçişte sağlayacakları faydaları ortaya koyma		Yasal düzenlemelere uyum Finansal faydalar
Büyüközkan ve Çifçi (2012)	Yeşil tedarikçi değerlendirme modeli		Farkındalığın artması Yasal düzenlemeler
Uttam vd. (2012)	İnşaat sektöründe yeşil satın alma	Beklenen işlevleri yerine getiren ve çevre etkisi daha az olan malzemelerin satın alınması	Artan müşteri talepleri Yasal düzenlemeler Maliyet azaltma
Walker ve Brammer (2012)	Sürdürülebilir satın alma, tedarikçi iletişimi ve e-satın alma arasındaki ilişkinin tanımlanması	Satın alma faaliyetlerinin çevresel, sosyal ve ekonomik açılarından değerlendirilerek gerçekleştirilmesi	Çevre bilincinin artması ve basın etkisi Yasal düzenlemeler Akademik yayınların artması
Testa vd. (2012)	Yerel yönetimlerin yeşil satın alma kararlarında etkili olan nedenlerin ekonomik yönden incelenmesi	Çevreye dost ürünlerin satın alınması	Artan farkındalık Yasal düzenlemeler Müşteri talepleri

Tedarikçi seçimi ve yönetimi yeşil satın alma için en önemli basamaktır (Sarkis, 2003; Zhu vd., 2010; Zhu ve Sarkis, 2004) Eğer bir üretici yeşil ürün üretmek istiyorsa, bu süreçte başlangıç noktası 'satın alma' olacaktır. Satın alınacak malzemelerin çevresel uygunluklarını sağlamak isteyen üretici hem mevcut hem de yeni tedarikçileri için kalite ve çevre beklentilerini ortaya koymalı, bu beklentilerinin karşılanıp karşılanmadığını sorgulamalı ve düzenli aralıklarla tedarikçi denetimleri yaparak sürecin devamlılığını garanti altına almalıdır.

3.1. Yeşil satın alma ile sağlanacak faydalar (Benefits of green purchasing)

Yeşil satın alma işletmelere birçok açıdan fayda sağlamaktadır. Bu faydaları finansal faydalar, yönetsel faydalar, çevresel faydalar ve sosyal faydalar olmak üzere dört ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür (SPN, 2007):

3.1.1. Mali faydalar (Financial benefits)

3.1.1.1. Maliyetlerin azalması (Decreasing costs)

Yeşil ürünleri üretmek için kullanılacak malzeme ve süreçler, daha az kaynak kullanımı gerektirdiklerinden, malzeme ve kaynak kullanımının azaltılması sağlanacak ve böylece maliyetler azaltılacaktır. Ürün yaşam döngüsü göz önüne alındığında maliyet azalması yalnızca malzeme ve kaynak kullanımı ile sınırlı kalmayacak, ayrıca atıkların bertarafı ve çevre, iş sağlığı ve güvenliği konularındaki giderlerin de azaltılması sağlanacaktır.

3.1.1.2. Marka imajının güçlenmesi (Strong brand image)

Marka imajı bir firmanın tercih edilebilirliği için çok önemli bir faktördür. Bu imaj firmanın tüm faaliyet ve ilişkilerinin sonucunda ortaya çıkar. Şirketin finansal büyüklüğü marka imajının en büyük göstergelerinden biridir. Tedarikçilerini kurum değerlerine göre seçen işletmeler marka değerlerini arttıracaktır.

3.1.1.3. Yasalara uyumu kolaylaştırma (Compliance with the law)

Üretimlerinde çevreye daha az zarar veren malzeme ve süreçleri kullanan üreticilerin çevre etkilerini yönetmek ve yasalara uyumluluklarını sağlamak için yapacakları harcamalar çok daha az olacaktır.

3.1.1.4. Yatırımcı çekme (Attracting investors)

Yapılan bir araştırmaya göre Avrupa'daki yatırımcıların %86'sı, sosyal ve çevresel risk yönetimi konularına önem veren firmaların uzun vadede pazar değerlerinde artış gerçekleşeceğini düşünmektedir (Sofres, 2001).

3.1.2. Yönetsel faydalar (Managerial benefits)

3.1.2.1. Organizasyon hedef ve değerlerine uyum (Compliance with organizational goals and values)

İşletmeler hedeflerini ve değerlerini tanımlar ve kamuoyu ile paylaşırlar. Belirledikleri bu hedef ve değerleri gerçekleştirmelerinde yeşil satın alma faaliyetleri önemli rol oynamaktadır. Son zamanlarda birçok işletme sosyal, etik ve çevresel değerleri ile belirlediği kurumsal sosyal sorumluluk prensiplerini ortaya koymakta ve bunu tüm paydaşları ile paylaşmaktadırlar. Tanımlanan değer ve hedeflerin iş süreçleri ile uyumlu hale getirilmesi sonucunda paydaş desteği artacak, müşterilerin ve kamuoyunun güveni kazanılacaktır.

3.1.2.2. İş risklerini azaltma (Reduced business risks)

İşletmeler her zaman üzerlerindeki iş risklerini azaltmak isterler. Yeşil satın alma anlayışı bu anlamda işletmelere avantaj sağlar. İş süreçlerinde çevresel, sosyal ve etik boyutların değerlendirilmesi risklerin azaltılması anlamında faydalı olacaktır (Little, 2003). Yönetimde proaktif yaklaşımlar riskleri azaltmaya yardımcı olur. Üreticiler tedarikçilerinden kaynaklanabilecek riskleri de yönetmek isterler. Bu amaca da hizmet edecek şekilde oluşturulacak yeşil satın alma politikaları ve prosedürleriyle satın alınacak malzemelerin ve hizmetlerin çevresel etkileri kontrol altına alınabilir.

3.1.2.3. Etkin tedarik zinciri yönetimi ve ürün geliştirme (Effective supply chain management and product development)

Tedarikçiler ile yakın ilişki içerisinde olmak, beklentilerin anlaşılmasını ve karşılanmasını kolaylaştıracaktır. Tedarikçilerin ürün geliştirme süreçlerine etkin katılımının sağlanması ile bilgi alışverişi yapılması ve daha üstün nitelikli ürünlerin üretilmesi mümkün görünmektedir. Satın alma biriminin tedarikçiler ile yakın ilişkiler

içerisinde olması iki tarafa da fayda sağlayacaktır: üretici beklentilerini daha rahat aktarabilecek, tedarikçiler de üreticinin beklentilerini yakın ilişkiler sayesinde daha kolay anlayacaktır. Üreticilerin kendi ürünlerinin daha çevreci olması için üretimde kullanılan malzemelerin geliştirilmesi süreçlerine desteği ve katılımı sayesinde, tedarik zincirine dahil olan diğer tedarikçilerde de bu desteği sağlama isteği doğacaktır. Böylelikle, domino etkisi ile birçok tedarikçi ile ortak geliştirme projelerinin tetiklenmesi mümkün olacaktır.

3.1.3. Çevresel faydalar (Environmental benefits)

Yeşil satın almanın çevresel birçok faydası bulunmaktadır. Kaynakların etkin şekilde kullanılması ile hızla tükenmeye yaklaşan doğal kaynakların korunması mümkündür. Yeşil ürün ve hizmetler daha az kirliliğe neden olmakta ve bunun sonucunda küresel ısınmaya neden olan emisyonların azaltılması mümkün olmaktadır.

3.1.3.1. Atıkları önleme (Preventing waste)

Üretim süreçlerinde ve ürünlerin tasarımlarında yapılacak geliştirmelerle ürünün üretilmesi ve kullanılması sonucunda açığa çıkan atıkları azaltmak mümkündür. Üstelik bu şekilde atıkların azaltılması yalnızca çevre için faydalı olmakla kalmayacak, aynı zamanda azalan atıkların bertarafı için daha az enerji ve malzeme kullanılacaktır. Ürünlerin tasarımı aşamasında kullanılacak malzemelere karar verirken geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı seçeneği de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Aynı şekilde yine tasarım sürecinde, ürünün ömrünü tamamladıktan sonra geri dönüştürülebilir ya da yeniden kullanılabilir nitelikte olmasına da özen gösterilmelidir. Tüm bu öneriler dikkate alınarak yapılacak malzeme ve teknoloji satın alımları ile atıkların azaltılması mümkün olacaktır.

3.1.3.2. Kaynak kullanımını azaltma (Reduced resource usage)

Yeşil satın alma, geri dönüştürülmüş ve yeniden kullanılabilir malzemelerin satın alınmasını desteklediği için, kaynak kullanımının azaltılması üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle kâğıt ve plastik ürünlerinin satın alınması kararında geri dönüşümlü ve yeniden kullanılabilir malzemelerin tercih edilmesi hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlayacaktır.

3.1.3.3. Sera gazı etkisinin azaltılması (Reduced greenhouse gas effect)

Üreticilerin daha çevreci malzemeler satın alma tercihleri, üretim sırasında açığa çıkacak sera gazı emisyonu miktarı üzerinde doğrudan etkilidir. Daha çevreci malzemelerin satın alınması ile sera gazı emisyonunu azaltmak mümkündür.

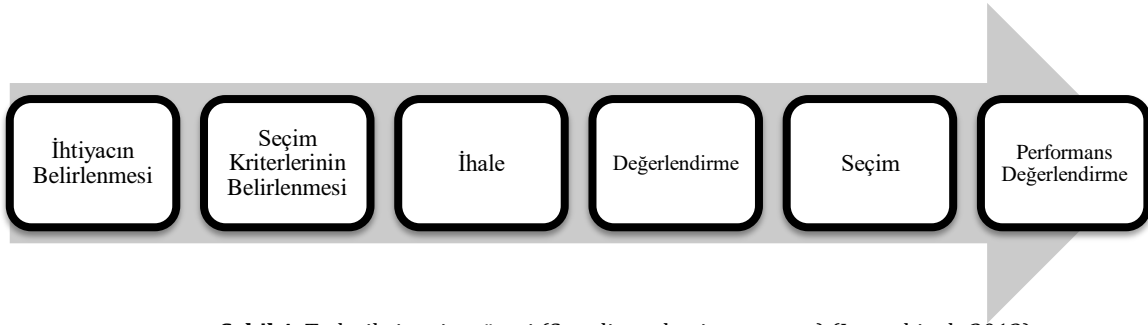
3.1.4. Sosyoekonomik Faydalar (Socioeconomic Benefits)

Yeşil ürünler; üreticiden, tedarikçiye, müşteriden kamuoyuna kadar tedarik zinciri içerisinde bulunan tüm oyunculara fayda sağlar. Çevre ve insan sağlığının korunmasına destek olur, çalışanların iş sağlığı ve güvenliğini güvence altına alır ve üretici için rekabette avantaj sağlar (SPN, 2007).

3.2. Yeşil tedarikçi seçimi (Green supplier selection)

Özellikle son 25 yılda artan rekabet, üreticileri rekabetçi olmak için yeni yollar aramaya itmiştir. Birçok üretici tedarik zinciri yapılanmalarını daha yalın hale getirmiş ve tedarikçileri ile olan ilişkilerine eskisinden daha çok önem verir hale gelmiştir (Copacino, 1996; Mason, 1996). Şirketler, tedarikçilerini, kapasitelerini en yüksek düzeyde kullanmaya yönlendirerek, ürünlerinin kalitesini artırmaya, yeni ürün geliştirme sürelerini kısaltmaya ve teknolojik gelişmeleri yakından takip etmeye zorlamışlardır (Ragatz vd., 1997). Fakat son yıllarda artan çevre duyarlılığı tedarikçi seçimi ve değerlendirmesine bambaşka bir boyut kazandırmıştır.

Tedarikçi seçimi, ihtiyaçların ortaya konması ile başlar. Bu aşamadan sonra satın alma departmanlarına düşen görev, potansiyel tedarik kaynaklarını belirlemek ve bu kaynaklarla iletişime geçmektir. Aranılan malzeme için gerekli koşulları sağlayabilen tedarikçi adayları arasından yapılacak seçimde, pazarlık ya da ihale gibi yöntemler kullanılabilir. Bu sürece ait akış Şekil 4'te gösterilmiştir.

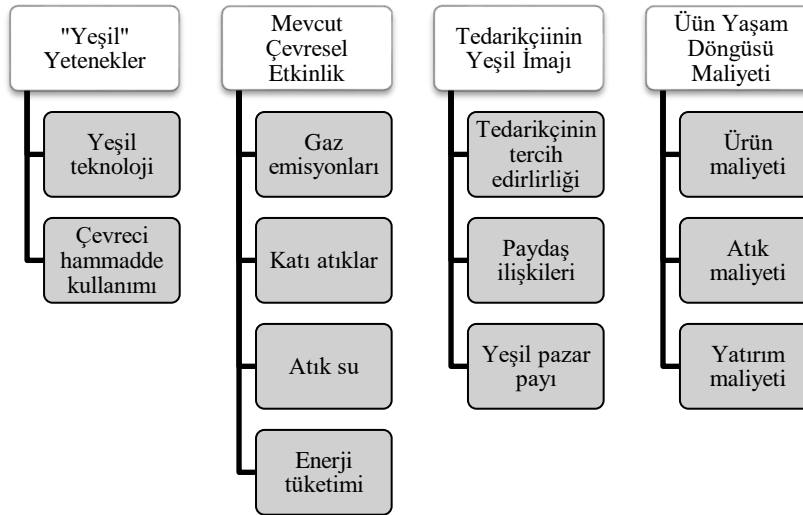


Şekil 4. Tedarikçi seçim süreci (Supplier selection process) (Igarashi vd., 2013)

Geleneksel olarak satın alma sürecinde tedarikçi seçimi için kullanılacak kriterler aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Birim fiyat
- Talepleri zamanında karşılayabilme
- Kalite beklentisini karşılama
- Dürüst iletişim
- Endüstriyel bilgi ve tecrübe
- Esneklik, ani taleplere cevap verme hızı
- Finansal durum
- Etik standartlara uyum
- Referanslar
- Tedarikçinin büyüklüğü
- Üretici ile tedarikçi arasındaki kültür uyumu

Yeşil tedarikçi seçiminde, süreç benzer şekilde işlese de, en önemli farklılık seçim kriterlerinin belirlenmesi ve performans değerlendirmesi basamaklarında görülmektedir. Artan çevre duyarlılığının, üreticilerin tedarikçi seçimi ve değerlendirme süreçlerine etkisi kaçınılmaz olmuştur. Bu bağlamda, satın alma sürecinde çevreci yaklaşımlarla ilgili birçok araştırma yapıldığı görülmektedir. Yeşil satın alma ve yeşil tedarikçi seçimi konuları birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve geleneksel tedarikçi seçimi kriterlerine, çevre ile ilgili birçok yeni kriter eklenmiştir. Konuya ilişkin yapılan araştırmaların temelini oluşturan modellerden biri Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Noci (1997)'nin yeşil tedarikçi seçim modeli (Noci (1997)'s green supplier selection model)

Noci (1997), çevresel bakış açısıyla en etkin tedarikçi seçimi için geliştirdiği modelde, tedarikçilerin performansını değerlendirmek üzere “yeşil yetenekler”, “çevresel etkinlik”, “yeşil imaj” ve “ürün yaşam döngüsü maliyeti” kriterlerini ve bunlara ait alt boyutları belirlemiştir. Geliştirdiği Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP: Analytic Hierarchy Process) modelini otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firma için kullanmış ve sadece ekonomik kriterlerin değerlendirildiği modellere kıyasla farklı sonuçlar elde edildiğini ifade etmiştir. Bu farklılığın temel sebebinin, geliştirdiği modelde tedarikçilerin çevreye ilişkin yenilikçi yeteneklerinin ve yeşil imajlarının değerlendirilmesinin etkili olduğunu belirtmiştir.

Handfield vd. (2002), yeşil tedarikçi değerlendirme sürecinde önemli olabileceğini düşündükleri tüm kriterleri bir listede toplayarak, bu listeyi Fortune 500 sıralamasında yer alan bazı şirketlerin tedarik zinciri yöneticilerinden oluşan bir gruba sunmuşlar ve bu kriterler arasından en önemlilerini seçmek üzere uzlaşmaya varana kadar tartışmalarını istemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda en önemli ölçülebilir kriterler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- ISO 14000 sertifikasyonu
- Ozon tabakasına zarar verici maddelerin bulup bulunmaması
- Geri dönüşüm
- Uçucu organik bileşiklerin bulup bulunmaması
- Çevre Koruma Örgütü (EPA: Environmental Protection Agency) listesinde yer alan 17 maddenin bulup bulunmaması
- Yeniden üretim/kullanım imkânı
- Ambalaj malzemelerinin yeniden kullanım imkânı
- Tersine lojistik faaliyetleri
- EPA programlarında gönüllü olarak yer alma
- Çevre ile ilgili kayıtların halka açık olması

Handfield vd. (2002) bu kriterleri 6 ana kriter ((i) ürün özellikleri, (ii) atık yönetimi, (iii) sertifikasyon, (iv) tersine lojistik, (v) yasal düzenlemelere uyum ve (vi) çevre yönetim programları) altında toplayarak bir AHP modeli oluşturmuştur. Oluşturulan model kullanılarak birincisi otomotiv, ikincisi kâğıt, üçüncüsü ise giyim endüstrisinde faaliyet gösteren üç firma için tedarikçi seçimi yapılmıştır. Otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren üretici firma için model anlamlı sonuç vermiştir; ancak kâğıt endüstrisinde faaliyet gösteren firma için iki tedarikçi aynı ağırlığı almıştır. Araştırmacılar bunun nedenini araştırdığında, kâğıt üretimi için malzeme sağlayan tedarikçilerin yasalar ile kontrol edildiğini, çevresel düzenlemelere uymadıkları takdirde zaten çalışamayacaklarını fark etmişlerdir. Bu durum modelin, yasaların çok sıkı uygulandığı endüstrilerde seçiciliğini yitirdiğini ortaya çıkarmıştır.

Lu vd. (2007) tedarikçi seçiminde önemli olan kriterlerin üretim süreçleri ile birlikte değerlendirileceği bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde tedarikçi seçimi için belirlenen “malzeme”, “enerji”, “katı atık”, “sıvı atık” ve “gaz atık” kriterlerini, “üretim öncesi”, “üretim”, “dağıtım ve ambalaj”, “ürün kullanımı, bakımı” ve “bertaraf” aşamaları için değerlendirmişlerdir. Bu modelde yer alan kriterlerin ikili karşılaştırmaları bir anket yardımıyla yapılmış ve %35 ağırlıkla en önemli kriter “malzeme” kriteri olarak bulunmuştur. Ayrıca sürece göre kriterlerin ağırlıklandırılması da yapılmış ve tedarikçi seçimi için en önemli kriterin “üretimde kullanılan malzeme” olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Lee vd. (2009)’de benzer bir hiyerarşi yapısı oluşturarak tedarikçiler arasından seçim yapmak üzere yeşil tedarikçi performans kriterlerini ((i) kalite, (ii) teknolojik yeterlilik, (iii) kirliliğin kontrolü, (iv) çevre yönetimi, (v) yeşil ürün ve (vi) yeşil yetkinlikler) ve bu kriterlerin alt kriterlerini belirlemiştir. Bu kriterleri bulanık AHP metodunu kullanarak ağırlıklandırmış ve oluşturulan modeli televizyon için panel üreten yüksek teknoloji bir üreticinin tedarikçilerini değerlendirmek üzere kullanmışlardır. Yapılan ağırlıklandırmalarda kriterler arasında en yüksek ağırlığı “kalite” kriteri almıştır. Alt kriterler bazında ağırlıklandırma yapıldığında ise ilk üç sıra “kalite” başlığı altındaki “kalitesizlikle başa çıkma”, “kalite yönetimi” ve “kalite sertifikaları” şeklinde gerçekleşmiştir.

Özellikle 2007 yılında yürürlüğe giren “Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması Tüzüğü (REACH – Regulation of the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)” sonrasında üreticilerin çevresel etki sorgulamaları daha sıkı hale gelmiştir. Hsu ve Hu (2009) tedarikçi seçimi yapılırken zararlı maddelerin yönetilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, “tedarik yönetimi”, “Ar&Ge yönetimi”, “süreç yönetimi”, “giriş kalite yönetimi” ve “yönetim sistemleri” kriterlerini (alt kriterleri ile birlikte) kapsayan bir Analitik Ağ Süreci (ANP: Analytic Network Process) modeli geliştirmişlerdir. Model kullanılarak tedarikçi seçiminin yapıldığı bu çalışmada, kriterler arasındaki karşılaştırmada en önemli olan kriter “tedarik yönetim” kriteri olarak belirlenmiştir.

Geliştirilen birçok yeşil tedarikçi seçim modelinin geleneksel tedarikçi seçiminden uzaklaştığını düşünen Büyüközkan ve Çifçi (2011), geleneksel tedarikçi seçimi kriterleri ((i) ürün maliyeti, (ii) ürün kalitesi ve (iii) servis performansı) ile yeşil tedarikçi seçimi kriterlerinin ((iv) çevre performansı) bir arada değerlendirildiği bir AHP modeli geliştirmiş ve geliştirdikleri bu modeli kullanarak, Türk otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir üretici için tedarikçi seçimi çalışması yapmışlardır. Yapılan değerlendirmede ana kriterlerden en önemlisi “çevre performansı” olarak belirlenmiştir. Shaik ve Abdul-Kader (2011)’de yeşil tedarikçi seçimi için oldukça detaylı hiyerarşik bir model önermiştir. Bu model ile endüstriyel teçhizat üretimi yapan bir üretici için 3 tedarikçi arasında seçim yapılmaya çalışılmış; kriterlerden en önemli olanının “çevre dostu hammadde kullanımı” olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Modelde değerlendirilen kriterler arasında “çevresel verimlilik”, “çevre ve kalite sistemleri”, “yeşil tasarım”, “yeşil imaj”, “yeşil yetkinlikler”, “yeşil ürün maliyeti”, “yönetimsel yetkinlikler” ve “teknik yetkinlikler” kriterleri yer almaktadır. Yeşil tedarikçi seçme kriterlerinin zaman zaman birbirlerini etkilediğini fark eden Lin

vd. (2012) yeşil tedarikçi seçimi için “maliyet”, “kalite”, “servis”, “güven” ve “yeşil” kriterlerinin yer aldığı bir ANP modeli geliştirmiş ve çalışma sonucunda “yeşil” kriterinin alt kriterleri olarak modelde yer alan “çevreyle dost ürün” ve “sosyal sorumluluk” alt kriterleri en önemli alt kriterler olarak belirlemiştir.

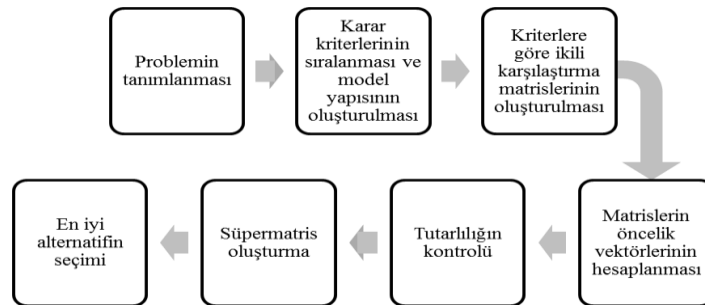
Tsui ve Wen (2012) daha önce yayınlanmış çalışmalardan derledikleri ve geliştirdikleri modelleri ile önceki çalışmalara kıyasla daha çok kriteri göz önüne aldıklarını iddia ettikleri çalışmalarında, Tayvanlı panel üreticisi bir firma için optoelektronik ve elektronik komponent üreten on tedarikçiyi, otuz kriter üzerinden değerlendirmişlerdir. Çalışmada, kriterlerin ağırlıklandırılması ve tedarikçilerin değerlendirilmesi için AHP ve PROMETHEE yöntemleri kullanılmıştır. Modelde “kalite”, “finansman”, “servis”, “teknoloji” ve “organizasyonel kültür” gibi geleneksel tedarikçi değerlendirme kriterlerinin yanı sıra “yeşil yönetim sistemi”, “tedarikçinin yeşil imajı” ve “yeşil ürün yönetimi” gibi yeşil tedarikçi seçimine yönelik kriterler de bulunmaktadır. Zhou vd. (2012) de kriterler arası ilişkileri göz önüne alan ve hem geleneksel tedarikçi seçim kriterlerini hem de yeşil tedarikçi seçimi kriterlerini bir arada kullanıldığı bir model önermiştir. ANP yönteminin kullanıldığı bu çalışmada, kimyasal üreticisi bir firma için vaka analizi yapan araştırmacılar, belirledikleri kriterler için ikili karşılaştırmalar yapmış ve en önemli kriteri “ürün kalitesi” olarak belirlemiştir. Hashemi vd. (2015) de yine kriterler arası etkileşimi göz önüne alan bir model geliştirmişlerdir. Araştırmaya konu olan yeşil tedarikçi seçimi kriterleri “kirlilik”, “kirliliğin kontrolü”, “kaynak tüketimi”, “eko-tasarım”, “çevre yönetim sistemi”, “yeşil imaj”, “yeşil yetkinlikler”, “yeşil ürün”, “eğitim”, “üst yönetim desteği” olarak belirlenmiştir. Otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren bir üreticinin tedarikçi seçimi için geliştirilen model için, kriterler arasında yapılan ikili karşılaştırmalar sonucunda en önemli kriter “kaynak tüketimi” olarak belirlenmiştir.

4. Metodoloji (Methodology)

İnsanlar karmaşık bir sorunla karşılaştıklarında söz konusu sorunu daha iyi anlayabilmek için sorunu bileşenlerine ayırmalı ve bu bileşenleri hiyerarşik bir şekilde düzenlemelidirler. Bu ihtiyacı karşılamak için ortaya atılan yöntemlerden biri olan AHP, ilk olarak 1968 yılında Myers ve Alpert tarafından literatüre tanıtılmıştır. Daha sonra Saaty, 1977 yılında bu fikri bir model olarak geliştirerek, karar verme problemlerinin çözümünde kullanılabilir hale getirmiştir. AHP, karar hiyerarşisinin tanımlanabilmesi durumunda kullanılan, kararı etkileyen kriterler/alt kriterler açısından karar alternatiflerinin önem değerlerini veren bir karar verme yöntemi olarak tanımlanabilir (Saaty, 2008). Yöntem bir karar hiyerarşisi üzerinde, önceden tanımlanmış bir karşılaştırma skalası kullanılarak, gerek kararı etkileyen kriterlerin/alt kriterlerin, gerekse de bu kriterler/alt kriterler açısından karar alternatiflerinin önem değerlerini belirlemek üzere karar vericiler tarafından gerçekleştirilen ikili karşılaştırmalara dayanmaktadır. ANP ise araştırma konusu problemin hiyerarşik olarak modellenemediği, modelde yer alan kriterlerin ve/veya alt kriterlerin karşılıklı olarak birbirlerini etkilediği veya geri beslemelerin söz konusu olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. AHP ve ANP’de ölçüm için her soruna ilişkin amaç, kriterler, alt kriterler ve alternatiflerden oluşan bir hiyerarşi ya da ağ oluşturulur. AHP’de alternatifler kriterleri, kriterler de amacı etkilemektedir. Kriterlerin alternatifleri etkilemediği, kriterlerin ve seçeneklerin kendi içlerinde birbirinden bağımsız oldukları varsayılmaktadır (Topçu, 2019). ANP ise bağımlılık ve geri beslemeleri de barındırır ve daha hassas bir ölçüme olanak tanır (Saaty, 2001). Bu çalışmada oluşturulan yeşil tedarikçi seçim modeli, bünyesinde bağımlı kriterleri barındırdığından, ölçüm yöntemi olarak ANP yöntemi seçilmiştir.

4.1. ANP: Analitik ağ süreci (ANP: Analytic network process)

Bir karar verme probleminin ANP ile çözülebilmesi için Şekil 6’da gösterilen temel adımlar izlenmelidir (Saaty, 2001).



Şekil 6. ANP ile problem çözümünün aşamaları (Stages of problem solving with ANP)

4.1.1. Problemin tanımlanması ve modelin oluşturulması (Problem structuring and model construction)

Karar verme problemlerinin tanımlanması genel olarak iki aşamadan oluşmaktadır: (i) karar alternatiflerinin saptanması ve (ii) alternatifleri kıyaslamak için kullanılacak kriterlerin/alt kriterlerin saptanması. Alternatifleri değerlendirmek için kullanılacak kriterlerin/alt kriterlerin doğru belirlenmesi ve her bir kriterin/alt kriterin detaylı ve açık bir şekilde tanımlanması, ikili karşılaştırmaların tutarlı olması açısından kritik önem taşımaktadır. Bu aşamada karar vericiyi sonuca götürecektir kriter, alt kriter ve alternatifler belirlendikten sonra, bunlar arasındaki tek yönlü ve karşılıklı tüm ilişkiler ortaya konmalıdır (Saaty, 2001).

4.1.2. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması ve öncelik vektörlerinin hesaplanması (Pairwise comparison matrices and priority vectors)

İkili karşılaştırma matrisleri, uzmanlardan toplanan verilerle oluşturulur. Karar vericilerden, bir kerede iki elemanı (kriter, alt kriter ya da alternatif) kendi üst düzey kriterlerine göre ne kadar önemli veya etkin oldukları açısından karşılaştırılacağı bir dizi ikili karşılaştırma sorusuna yanıt vermeleri istenir. Karşılaştırmalar yapılırken göreceli önem değerleri, 1 ile 9 arasında bir ölçekle belirlenir (Saaty, 1990). 1 puan, karşılaştırılan iki elemanın üst düzey kriterine göre eşit öneme sahip olduğu anlamına gelirken; 9 puan, karşılaştırılan iki elemandan birinin diğerine göre aşırı öneme sahip olduğunu gösterir. İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulurken kümeler arası, aynı küme içinde yer alan elemanlar arası ve tüm elemanlar ile alternatifler arası karşılaştırmalardan yararlanır. Örnek bir ikili karşılaştırma matrisi aşağıda görülmektedir:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada A ikili karşılaştırma matrisini; $a_{ij}=1/a_{ji}$ olmak üzere, a_{ij} (a_{ji}), i . (j .) elemanın j . (i .) elemana kıyasla önem değerini göstermektedir ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

İkili karşılaştırmalar tamamlandığında Eşitlik (2) kullanılarak karşılaştırılan elemanlarla ilgili yerel öncelik vektörleri belirlenebilir (Asan ve Soyer, 2009):

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \quad (2)$$

Burada w öncelik vektörü; λ_{max} ise A ikili karşılaştırmalar matrisinin en büyük özvektörüdür. Bu aşama sonucunda, ikili karşılaştırmalar ile elde edilen öncelik vektörleri, söz konusu elemanların göreceli önem değerlerini tahmin etmek için kullanılır.

4.1.3. Süpermatris oluşturma (Supermatrix formation)

Birbirine bağımlı etkilere sahip bir sistemde global öncelikleri elde etmek için, bir önceki adımda elde edilen yerel öncelik vektörleri, 'süpermatris' olarak adlandırılan bir matrisin sütunlarına girilir. Süpermatris, aslında her matris segmentinin, bir sistemde var olan iki düğüm (elemanlar veya kümeler) arasındaki ilişkiyi temsil ettiği, bölümlenmiş bir matristir. Süpermatriste yer alan değerler iki bileşenin birbirine etkisini ifade ederken, sıfır değeri iki bileşenin birbirine etkisi olmadığı anlamına gelmektedir. Süpermatriste yer alan her sütunun toplamı bir olacak şekilde dönüştürülerek, 'ağırlıklı süpermatris' elde edildikten sonra, sistemde yer alan bileşenlerin birbirlerine olan uzun dönemli etkilerini elde etmek üzere, ağırlıklı süpermatrisin $(2k + 1)$. üssü alınır (Saaty ve Vargas, 2013). Burada k keyfi olarak belirlenen büyük bir sayıdır ve oluşan bu yeni matris, 'limit süpermatris' olarak adlandırılır. Limit süpermatris bütün sütunları aynı olan bir matristir. Bu matriste yer alana bloklar normalize edilerek, her bir elemanın öncelikleri belirlenir.

Elde edilen limit süper matris ile alternatiflerin ve kriterlerin/alt kriterlerin önem değerleri belirlenmiş olur. Eğer karar vericiler alternatifler arasında seçim yapmak istiyorsa; en yüksek önem değerine sahip alternatif en iyi seçenek olacaktır. Eğer karar vericiler kriterler arasında en önemli kriteri belirlemeye çalışıyorsa, en yüksek ağırlığa sahip kriter süreçte kritik önem taşımaktadır.

4.1.4. Tutarlılık kontrolü (Consistency check)

ANP yönteminde verilecek kararın tutarlılığı, karar vericilerin yaptıkları ikili karşılaştırmaların tutarlılıkları ile doğrudan ilgilidir. Bu sebeple karşılaştırmaların tutarlılığının ölçülmesi için Tutarlılık Oranının (CR: Consistency Ratio) hesaplanması gerekmektedir. CR hesabı için gerekli olan ve temel değer adı verilen λ katsayısının hesaplanması için A ikili karşılaştırma matrisi ile W öncelik vektörünün matris çarpımından, D sütun vektörü elde edilir (Saaty, 1990).

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Bulunan D sütun vektörü ile W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden (Eşitlik (4)) her bir değerlendirme kriterine ilişkin temel değer E_i elde edilir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

Bu değerlerin aritmetik ortalaması ise (Eşitlik (5)) karşılaştırmaya ilişkin temel değeri (λ) verir.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (5)$$

λ hesaplandıktan sonra Tutarlılık Göstergesi (CI: Consistency Index) Eşitlik (6) yardımıyla hesaplanabilir.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (6)$$

Tutarlılık kontrolünde son aşama ise Rasgele Tutarlılık Endeksi (RI: Random Consistency Index) değerinin belirlenmesidir. Bunun için öncelikle Tablo 2'den modeldeki kriter sayısına karşılık gelen RI değeri seçilir ve sonrasında Eşitlik (7) kullanılarak CR değeri hesaplanır (Saaty, 1980).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Tablo 2. RI değerleri (RI Values)(Saaty, 2002)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Hesaplanan CR değerinin %10'dan küçük olması karar vericinin yaptığı karşılaştırmaların tutarlı olduğunu gösterir. CR değerinin %10'dan büyük olması ya ANP'deki bir hesaplama hatasını ya da karar vericinin karşılaştırmalarındaki tutarsızlığını gösterir (Saaty, 1980, 2002).

4.2. ANP'de grup kararı (Group decision in ANP)

Herhangi bir problemle ilgili karar verici grubun tatmin olduğu bir kararın alınabilmesi için, değerlendirmelerin ve önceliklerin tüm grup üyeleri tarafından kabul görmesi gerekir. Bu durum ise ancak karar vericilerin bireysel önceliklerinin grubun öncelikleri ile uyumu ile mümkün olacaktır (Saaty, 2008). Saaty (2008)'e göre bireylerin önceliklerinden bir grup kararı çıkarılması için tek yol geometrik ortalama alınmasıdır. Eğer karar vericilerin konu üzerindeki uzmanlıkları ve karar üzerindeki etkileri eşit seviyede ise sonuçların doğrudan geometrik ortalamasının alınması yeterli olacaktır. Fakat grup üyelerinin yetkinlikleri ve karar verme güçleri farklı ise güçlü olan karar vericinin karar üzerindeki etkisi yükseltilecek hesaplama yapılmalıdır.

5. Geliştirilen Yeşil Tedarikçi Seçim Modeli ve Uygulama (Developed Green Supplier Selection Model and Its Application)

Dünya genelinde tüm üreticiler gelişen yeşil tedarik zinciri akımından etkilenmektedirler. Özellikle rekabet yoğunluğunun oldukça yüksek olduğu beyaz eşya sektöründe bu etki kendini günden güne daha da çok hissettirmeye başlamıştır. Bu bölümde Türkiye ve Avrupa pazarında çok önemli bir paya sahip beyaz eşya üreticilerinden birinde karşılaşılan bir tedarikçi seçim problemi ortaya konulacak ve problemin çözüm aşamaları aktarılacaktır. Bu kapsamda, çevresel etkiler göz önüne alınarak tedarikçi seçimi yapılmasına imkân veren yeni bir model önerilecek ve alternatif tedarikçiler bu modele göre değerlendirilerek, en uygun tedarikçinin seçimi sağlanacaktır.

5.1. Beyaz eşya sektörüne genel bakış (Overview of the white goods sector)

T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2013)'nın yayınladığı bir rapora göre beyaz eşya sektörü, elektrikli ev aletlerini ve dayanıklı tüketim mallarını kapsayacak şekilde tanımlanmaktadır. Beyaz eşya olarak değerlendirilen başlıca ürünler; buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın, ocak, süpürge gibi temel ürünlerin yanı sıra, tost makinesi, robot, meyve presi, karıştırıcı, doğrayıcı gibi küçük ev aletleri şeklinde sıralanabilir. Ayrıca, derin dondurucu, klima, şofben, termosifon, su arıtma cihazı gibi ürünler de beyaz eşya olarak değerlendirilmektedir.

Tüm dünyada artan nüfus ve hızla gelişen teknolojinin bir sonucu olarak artan tüketim miktarlarını karşılayabilmek üzere birçok sanayi kolunda üretim miktarları artmaktadır. Bu noktada, özellikle gelişmiş ülkelerdeki artan talebi karşılamak, gelişmekte olan ülkeler için büyük bir fırsat olarak değerlendirilmektedir. Beyaz eşyada kullanılan teknolojinin belli bir olgunluğa gelmiş olması ve gelişmekte olan ülkelerin bu teknolojiyi lisans yoluyla edinebilmesi sonucunda üretim, gelişmiş ülkelerden gelişmekte olan ülkelere doğru kaymaktadır. Bu durum karşısında zarar görmeyen gelişmiş ülkelerdeki üreticiler ise Ar&Ge faaliyetlerine ağırlık vererek, teknolojik geliştirmelerle ürünlerinde farklılık yaratmaya çalışmaktadırlar.

Beyaz eşya sektöründe ihracat dağılımı incelendiğinde; Çin, dünya ihracatındaki % 32,8'lik payı ile en çok ihracat yapan ülkeler arasında başı çekmektedir ve Çin'in ardından Avrupa'nın en önemli beyaz eşya üreticilerinden olan Almanya % 9,2 pay ile ikinci olurken, Almanya'yı sırasıyla %8,2'lik ve %7'lik payları ile Polonya ve İtalya takip etmektedir. Türkiye, % 6,6'lık pay ile beşinci sırada yer almaktadır (T.C. Gümrük ve Ticaret Bakanlığı, 2015). Türkiye'de faaliyet gösteren başlıca beyaz eşya üreticileri arasında, Arçelik, Beko, Altus, Aygaz, Profilo, Bosch, BSH, Vestel, Ariston ve Indesit firmaları yer almaktadır.

5.2. Problemin tanımlanması (Identification of the problem)

Çalışmada, öncelikle tedarikçi seçiminde kullanılacak yeşil tedarikçi seçim kriterleri belirlenecek, daha sonra belirlenen seçim kriterleri ANP yöntemiyle önceliklendirilecek ve bu kriterler doğrultusunda, beyaz eşyaların yüzeyinde dış etkenlerden kaynaklanması muhtemel korozyonu önlemek için kullanılan bir hammaddenin, alternatif iki tedarikçinin hangisinden satın alınması gerektiğine karar verilecektir.

5.3. Çalışma grubunun oluşturulması (Forming the decision group)

Bir kararın sonucundan etkilenecek tüm taraflar karar alma aşamasında söz sahibi olmalıdır. Bu nedenle, uygulamanın gerçekleştirildiği beyaz eşya üreticisinde, çalışmaya konu olan malzeme için yeşil tedarikçi seçim kriterlerinin belirlenmesi için satın alma, üretim mühendisliği, çevre ve kalite departmanları birlikte hareket etmiştir. Çalışmaya ilgili şirketin 4 farklı üretim tesisinin her birinden bir üretim yöneticisi, bir kalite uzmanı, bir üretim elemanı ile satın alma biriminden bir uzman ve bir yönetici olmak üzere toplam 14 kişi katılmıştır. Ayrıca Enerji ve Çevre Yöneticiliğinden bir uzmanın görüşlerinden de faydalanılmıştır.

5.4. Alternatiflerin belirlenmesi (Determination of alternatives)

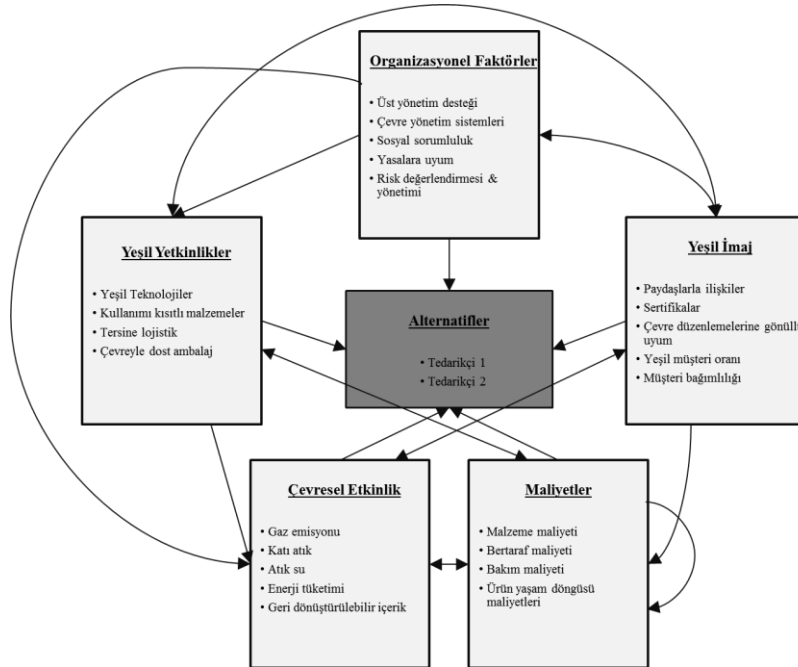
Yürütülen çalışmada yeşil tedarikçi seçim kriterlerinin önceliklendirilmesinin yanı sıra, yüzey kaplama kimyasalı üreticisi iki alternatif tedarikçi arasından en uygun olanı seçilecektir. Tedarikçilerin sunduğu malzeme özellikleri, malzeme ile çalışmak için gerekli proses koşulları, üretim maliyetleri, malzeme maliyeti, proses atıkları gibi ürün yaşam döngüsü boyunca etkili olan tüm etkenler düşünülerek alternatif tedarikçiler değerlendirmeye alınmıştır. Bu tedarikçilerden biri Almanya merkezli 75 milyar € ciro lu büyük bir kimyasal üreticisi; diğeri ise Amerika merkezli 15 milyar \$ ciro lu başka büyük kimyasal üreticisidir.

5.5. Tedarikçi değerlendirme kriterlerinin/alt kriterlerinin belirlenmesi (Determination of supplier evaluation criteria/sub-criteria)

Bölüm 3.2'de "Yeşil Tedarikçi Seçimi" başlığı altında detaylı bir şekilde incelenen çalışmalarda yer alan yeşil tedarikçi seçim kriterlerinden hareketle modelde kullanılmak üzere aşağıda listelenen 5 temel değerlendirme kriteri ve bunlara ait alt kriterler belirlenmiştir

- Yeşil yetkinlikler
- Çevresel etkinlik
- Organizasyonel faktörler
- Maliyetler
- Yeşil imaj

Literatürde yer alan çalışmalardan hareketle geliştirilen, yeşil tedarikçi seçiminde kullanılacak kriterler/alt kriterler ile bunlar arasındaki ilişkileri gösteren ANP modeli Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Geliştirilen yeşil tedarikçi seçim modeli (Developed green supplier selection model)

5.6. İkili karşılaştırmaların yapılması (Pairwise comparisons)

Yeşil tedarikçi seçiminde kullanılmak üzere geliştirilen ANP modelinde belirlenen ilişkiler doğrultusunda, kriterler, alt kriterler ve alternatiflerin önceliklendirilmesine yönelik ikili karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. İkili karşılaştırmaları yapmak üzere bir araya gelen ekibe öncelikle geliştirilen model tanıtılmıştır. Daha sonra karar vericilere ikili karşılaştırmalara yönelik fikirleri sorulmuş ve gruptan ortak karar çıkıncaya kadar tartışma devam ettirilmiştir. Değerlendirme süreci; karşılaştırılacak kriter, alt kriter ve alternatifler bilgisayardan katılımcılara gösterilerek ve gerekli yerlerde ek açıklamalar yapılarak, yaklaşık ikişer saat süren iki farklı oturumda gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda da bahsedildiği üzere, her bir ikili karşılaştırma için karşılaştırma sonucu olarak grubun fikir birliğine vardığı değerlendirmeler esas alınmış ve 1 ile 9 puan aralığında (1 puan, karşılaştırılan iki elemanın üst düzey kriterine göre eşit öneme sahip olması; 9 puan, karşılaştırılan iki elemandan birinin diğerine göre aşırı öneme sahip olması) yapılan kıyaslamalar ile toplanan grup kararına ilişkin veriler, Super Decisions v.2.10.0 programında oluşturulan modele girilmiştir (Bkz. Şekil 8). Yapılan karşılaştırmalar için programda ilgili karşılaştırma matrislerine girilen değerlendirmelere ait tutarsızlık değerleri, kabul edilebilir eşik değer olan %10 değerinin altında çıkmıştır.

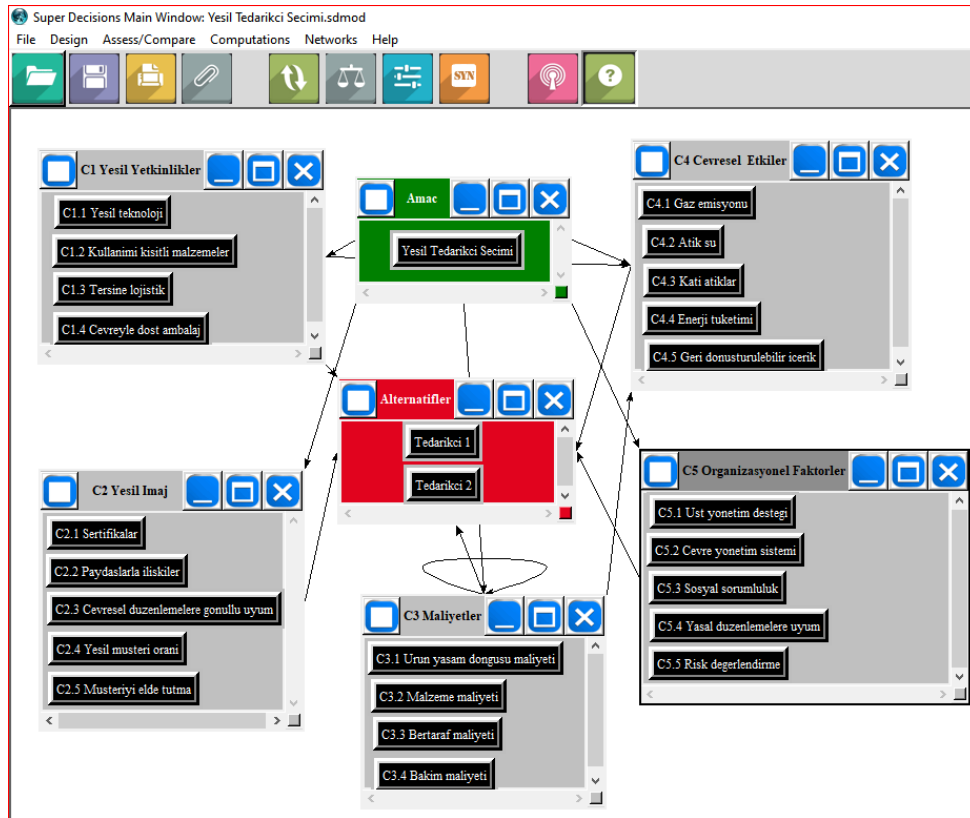
Değerlendirme sürecinde gerçekleştirilen iki oturumda, katılımcılar tarafından,

- yeşil tedarikçi seçimi açısından tüm kriterlerin ve alt kriterlerin karşılaştırması,
- alt kriterlerin, kendi kriterlerinin altındaki ilişkili oldukları alt kriterler açısından karşılaştırması (geri beslemeler),

- alt kriterlerin, diğer kriterlerin altındaki ilişkili oldukları alt kriterler açısından karşılaştırması (kümeler arası ilişkiler) ve
- tüm alt kriterler açısından alternatif tedarikçilerin karşılaştırması yapılmıştır.

Bu karşılaştırmalar yapılırken kullanılan örnek bazı sorular aşağıda verilmiştir:

- Yeşil tedarikçi seçimi açısından “yeşil imaj” kriteri mi yoksa “maliyetler” kriteri mi daha önemlidir, ne kadar?
- Yeşil tedarikçi seçimi açısından “çevresel düzenlemeye gönüllü uyum” alt kriteri mi yoksa “sertifikalar” alt kriteri mi daha önemlidir, ne kadar?
- “Maliyetler” kümesindeki “ürün yaşam döngüsü maliyeti” alt kriteri açısından, “malzeme maliyeti” alt kriteri mi yoksa “bertaraf maliyeti” alt kriteri mi önemlidir, ne kadar?”
- “Maliyetler” kümesindeki “ürün yaşam döngüsü maliyeti” alt kriteri açısından, “çevresel etkiler” kümesindeki “enerji tüketimi” alt kriteri mi yoksa “geri dönüştürülebilir içerik” alt kriteri mi önemlidir, ne kadar?”
- “Tersine lojistik” alt kriteri açısından “Tedarikçi-1” mi yoksa “Tedarikçi-2” mi daha etkindir, ne kadar?



Şekil 8. Geliştirilen yeşil tedarikçi seçim modelinin Super Decisions programı ekran görüntüsü (Screenshot of the developed green supplier selection model in Super Decisions program)

5.7. Bulgular ve değerlendirme (Findings and evaluation)

Tüm ikili karşılaştırmalar tamamlandığında, kriter, alt kriter ve alternatiflere ait öncelik değerleri hesaplanmış olmaktadır. Belirlenen bu öncelik değerleri, geliştirilen modelde yer alan tüm elemanların (kriter, alt kriter, alternatif) önem sıralarını belirlemektedir (Bkz. Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5). İlk olarak Tablo 3'te, yeşil tedarikçi seçiminde kullanılacak kriterlerin önem seviyeleri özetlenmiştir. Bu değerlere göre en önemli yeşil tedarikçi seçim kriteri %32,4'lük önem değeri ile “yeşil yetkinlikler” kriteri olurken, bu kriteri sırasıyla %24,3'lük ve %22'lik önem değerleri ile “yeşil imaj” ve “maliyetler” kriterleri izlemektedir. Bu sonuçlar, geleneksel tedarikçi seçim kriterlerine kıyasla yeşil tedarikçi seçim kriterlerinin katılımcılar tarafından daha önemli olarak algılandığını ortaya koymaktadır. Modelde yer alan kriterlerden “çevresel etkiler” ve “organizasyonel faktörler” kriterleri ise sırasıyla %10,9'lük ve %10,5'lik önem değerleri en düşük öneme sahip kriterler olarak saptanmıştır.

Tablo 4'te ise yeşil tedarikçi seçiminde kullanılacak her bir alt kriterin, içinde bulunduğu küme içerisindeki diğer alt kriterlere göre göreceli önem değerleri ile global önem değerleri görülmektedir. Yapılan ikili karşılaştırmaların sonucunda, her kümedeki alt kriterler arasında tedarikçi seçimi için en önemli olanlar;

- yeşil yetkinlikler kümesi için “kullanımı kısıtlı malzemeler”,
- yeşil imaj kümesi için “paydaşlarla ilişkiler”,
- maliyetler kümesi için “ürün yaşam döngüsü maliyeti”,
- çevresel yetkinlikler kümesi için “katı atıklar” ve
- organizasyonel faktörler kümesi için “yasal düzenlemelere uyum”

olarak belirlenmiştir.

Global önem seviyelerine bakıldığında da benzer sonuçlar göze çarpmaktadır. Sırasıyla, “kullanımı kısıtlı malzemeler”, “paydaşlarla ilişkiler”, “ürün yaşam döngüsü maliyeti”, “malzeme maliyeti”, “yasal düzenlemelere uyum” ve “katı atıklar” en önemli alt kriterler olarak dikkat çekmektedir.

Çalışma sırasında belirlenen yeşil tedarikçi seçim kriterlerine göre yapılan ikili kıyaslamalar sonucunda Amerika merkezli 15 milyar \$ ciro lu kimyasal üreticisi, Almanya merkezli 75 milyar € ciro lu kimyasal üreticisine göre daha üstün çıkmıştır. Bu nedenle seçim Amerikan firması olan ikinci tedarikçi lehine sonuçlanmıştır.

Tablo 3. Yeşil tedarikçi seçim kriterlerinin önem değerleri (Priority values of green supplier selection criteria)

Kriterler	Önem Değerleri
C1 Yeşil Yetkinlikler	0,324
C2 Yeşil İmaj	0,243
C3 Maliyetler	0,220
C4 Çevresel Etkiler	0,105
C5 Organizasyonel Faktörler	0,109

Tablo 4. Yeşil tedarikçi seçimine ilişkin alt kriterlerin önem değerleri (Priority values of green supplier selection sub-criteria)

Kriterler	Alt Kriterler	Kriterler Bazında Önem Değerleri *	Global Önem Değerleri
Yeşil Yetkinlikler	C1.1 Yeşil teknoloji	0,136	0,021
	C1.2 Kullanımı kısıtlı malzemeler	0,698	0,108
	C1.3 Tersine lojistik	0,081	0,013
	C1.4 Çevreyle dost ambalaj	0,085	0,013
Yeşil İmaj	C2.1 Sertifikalar	0,184	0,021
	C2.2 Paydaşlarla ilişkiler	0,609	0,071
	C2.3 Çevresel düzenlemelere gönüllü uyum	0,121	0,014
	C2.4 Yeşil müşteri oranı	0,041	0,005
Maliyetler	C2.5 Müşteriyi elde tutma	0,044	0,005
	C3.1 Ürün yaşam döngüsü maliyeti	0,455	0,056
	C3.2 Malzeme maliyeti	0,325	0,040
	C3.3 Bertaraf maliyeti	0,146	0,018
Çevresel Yetkinlikler	C3.4 Bakım maliyeti	0,073	0,009
	C4.1 Gaz emisyonu	0,063	0,005
	C4.2 Atık su	0,146	0,012
	C4.3 Katı atıklar	0,350	0,028
	C4.4 Enerji tüketimi	0,303	0,024
Organizasyonel Faktörler	C4.5 Geri dönüştürülebilir içerik	0,137	0,011
	C5.1 Üst yönetim desteği	0,248	0,013
	C5.2 Çevre yönetim sistemi	0,091	0,005
	C5.3 Sosyal sorumluluk	0,041	0,002
	C5.4 Yasal düzenlemelere uyum	0,576	0,030
	C5.5 Risk değerlendirme	0,044	0,002

*: İlgili küme içerisinde normalize edilmiş önem değerleri

Tablo 5. Alternatif tedarikçilerin yeşil tedarik açısından etkinlik değerleri (Effectiveness of alternative suppliers in terms of green purchasing)

Alternatifler	Önem Değerleri
Tedarikçi-1	0,251
Tedarikçi-2	0,749

6. Sonuçlar ve Öneriler (Results and Recommendations)

Bu çalışmada ürün yaşam döngüsündeki basamaklardan yalnızca satın alma ve bu sürecin en önemli parçası olan tedarikçi seçimi konularına odaklanılmıştır. Üreticiler arasında yoğun rekabetin yaşandığı günümüzde, doğru tedarikçilerle sürdürülebilir ilişkilerin kurulması her zamankinden daha önemli hale gelmiştir. Bu doğrultuda üreticiler tedarikçi seçiminde birçok kriteri göz önüne almak zorunda kalmaktadır. Bu kriterler üreticilerin çalışma alanlarına, ürettikleri ürünün özelliklerine, üretim koşullarına, üretim yaptıkları lokasyondaki yasal düzenlemelere, satış yaptıkları lokasyonlardaki yasal düzenlemelere, marka imajlarına ve daha birçok farklı parametreye bağlı olarak değişebilmektedir.

Yeşil satın alma ise bir üründe hangi hammaddelerin kullanıldığı, söz konusu hammaddelerin nereden temin edildiği ve ayrıca üretilen ürünlerin nasıl bertaraf edileceği ile ilgili konuları kapsamaktadır. Bu bağlamda, çevreye dost ürünler üretmek için, kullanılan kaynakların azaltılması, üretim süreçlerinin çevreye dost olacak şekilde yeniden yapılandırılması, kullanılan ambalaj malzemelerinin ve taşıma yöntemlerinin çevreye dost olanlarla değiştirilmesi ve yeniden kullanıma öncelik verilmesi, vb. adımlar atılarak iyileştirmeler yapılması mümkündür.

Tüm bu konularda sonuç almak üzere kritik öneme sahip olan yeşil tedarikçi seçim probleminde en önemli noktalardan biri probleme uygun seçim kriterlerinin belirlenmesidir. Geleneksel tedarikçi seçimi sürecinde ilk adım ihtiyacın ve bu ihtiyaca göre çalışma kriterlerinin belirlenmesidir. Bu kriterlere uyan tedarikçiler eşit koşullarda değerlendirme kapsamına alınır ve yapılan değerlendirme sonucunda uygun tedarikçi seçilir. Burada uygun tedarikçinin seçiminde değerlendirilen başlıca kriterler; birim fiyat, talepleri zamanında karşılayabilme, kalite beklentisini karşılama, dürüst iletişim, endüstriyel bilgi ve tecrübe, esneklik, ani taleplere cevap verme hızı, finansal durum, etik standartlara uyum, referanslar, tedarikçinin büyüklüğü ve üretici ile tedarikçi arasındaki kültür uyumu şeklinde sıralanabilir. Yeşil tedarikçi seçimi ise sayılan bu kriterlerin yanında, ilave bir takım çevre odaklı kriterleri içermektedir.

Bu çalışmada yeşil satın alma ve yeşil tedarikçi seçimi konuları incelenmiş ve bu alanda yapılan çalışmalardan faydalanılarak yeni bir yeşil tedarikçi seçim modeli geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen bu ANP modeli kullanılarak beyaz eşya üretiminde yüzeylerde korozyonu önlemek amacıyla kullanılan bir hammadde için tedarikçi seçimi uygulaması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan yeşil tedarikçi seçimi kriterleri, detaylı bir literatür incelemesinin sonucunda elde edilen birçok kriter arasından probleme uygun olanların seçilmesi ile elde edilmiştir. Buradaki kriter belirleme işlemi 14 kişilik uzman bir ekip tarafından yapılmıştır. Ekipte 4 adet üretim yöneticisi, 1 adet satın alma yöneticisi, 4 adet kalite uzmanı, 4 adet üretim elemanı ve 1 adet satın alma uzmanı yer almıştır.

İlgili ekip tarafından çalışmada kullanılmak üzere belirlenen ana kriterler arasında, (i) tedarikçinin çevresel yetkinlikleri, (ii) tedarikçinin çevresel etkinliği, (iii) maliyetler, (iv) organizasyonel faktörler ve (v) yeşil imaj kriterleri yer almaktadır. Yeşil tedarikçi seçiminde kullanılmak üzere yukarıda bahsedilen beş kriterin ve bunlara ait alt kriterlerin belirlenmesinin ardından, bu kriterler/alt kriterler arası iç ve dış bağımlılıklar belirlenmiştir. Bu adımlar sonrasında elde edilen ANP modeli, Super Decisions v.2.10.0 programına aktarılmış; modeldeki kriterlere/alt kriterlere ait önem değerlerini belirlemek ve alternatif tedarikçilerden birinin seçimi için, yine aynı uzman ekip tarafından ikili karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. İkili karşılaştırmalar yapılırken grup kararı esas alınmış ve herhangi bir karşılaştırmının puanlaması, uzman ekip uzlaşmaya varılıncaya kadar devam etmiştir.

Yaklaşık ikişer saat süren iki farklı oturumda gerçekleştirilen toplantılar sonucunda yeşil tedarikçi seçimi için belirlenen kriterlerin ve alt kriterlerin önem değerleri belirlenmiş ve bu araştırmaya konu olan tedarikçi seçimi yapılmıştır. Grup kararına göre tedarikçi seçiminde göz önüne alınması gereken en önemli iki ana kriter "*yeşil yetkinlikler*" ve "*yeşil imaj*" kriterleridir. Alt kriterler seviyesine inildiğinde ise en önemli ilk 5 alt kriter şu şekilde sıralanmaktadır: (i) "*kullanımı kısıtlı malzemeler*", (ii) "*paydaşlarla ilişkiler*" (iii) "*ürün yaşam döngüsü maliyeti*", (iv) "*malzeme maliyeti*" ve (v) "*yasal düzenlemelere uyum*".

Bu çalışma ile elde edilen en önemli sonuç, satın alma kararlarının artık sadece maliyet odaklı olmaktan çıktığını ve tedarikçilerin yeşil algılarının ve yetkinliklerinin de alım kararlarında etkili olduğunu göstermesidir. Bu sonuç daha önce literatürde gerçekleştirilen çalışmalarla paralellik göstermektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Asan, U., & Soyer, A. (2009). Identifying strategic management concepts: An analytic network process approach. *Computers & Industrial Engineering*, 56(2), 600–615.
- Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2011). A novel fuzzy multi-criteria decision framework for sustainable supplier selection with incomplete information. *Computers In Industry*, 62(2), 164–174.
- Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). A novel hybrid MCDM approach based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3000–3011.
- Büyüközkan, G., & Vardaloğlu, Z. (y.y.). Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi. 1–15.
- ÇEVKO. (y.y.). Ambalaj Nedir?
https://www.cevko.org.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=25&Itemid=138&lang=tr
- Chiou, T.-Y., Chan, H. K., Lettice, F., & Chung, S. H. (2011). The influence of greening the suppliers and green innovation on environmental performance and competitive advantage in Taiwan. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 822–836.
- Copacino, W. C. (1996). Seven supply-chain principles. *Traffic Management*, 35(1), 60.
- Gavronski, I., Klassen, R. D., Vachon, S., & do Nascimento, L. F. M. (2011). A resource-based view of green supply management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 872–885.
- Green, K., Morton, B., & New, S. (1996). Purchasing and environmental management: interactions, policies and opportunities. *Business Strategy and the Environment*, 5(3), 188–197.
- Gungor, A., & Gupta, S. M. (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4), 811–853.
- Handfield, R., Walton, S. V., Sroufe, R., & Melnyk, S. A. (2002). Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 141(1), 70–87.
- Hashemi, S. H., Karimi, A., & Tavana, M. (2015). An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved Grey relational analysis. *International Journal of Production Economics*, 159, 178–191.
- Hsu, C.-W., & Hu, A. H. (2009). Applying hazardous substance management to supplier selection using analytic network process. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 255–264.
- Igarashi, M., de Boer, L., & Fet, A. M. (2013). What is required for greener supplier selection? A literature review and conceptual model development. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 19(4), 247–263.
- Ijomah, W. L., Childe, S., & McMahon, C. (2004). Remanufacturing: A key strategy for sustainable development. *Proceedings of the 3rd International Conference on Design and Manufacture for Sustainable Development*.
- İstanbul Sanayi Odası. (2002). KOBİ'ler için çevre yönetim sistemi rehberi.
- Jorge, R., Martin, R., & Athena, S. (2006). *Green Purchasing: A Guide for Local Governments and Communities*.
- Lee, A. H. I., Kang, H.-Y., Hsu, C.-F., & Hung, H.-C. (2009). A green supplier selection model for high-tech industry. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 7917–7927.
- Lin, C.-T., Chen, C.-B., & Ting, Y.-C. (2012). A green purchasing model by using ANP and LP methods. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(2), 203–210.
- Little, A. D. (2003). *The Business Case for Corporate Responsibility*No Title.
- Lu, L. Y. Y., Wu, C. H., & Kuo, T.-C. (2007). Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis. *International Journal of Production Research*, 45(18–19), 4317–4331.
- Mason, T. (1996). Getting your suppliers on the team. *Logistics Focus*, 4, 10–12.
- Min, H., & Galle, W. P. (1997). Green purchasing strategies: trends and implications. *International Journal of Purchasing and Materials Management*, 33(2), 10–17.
- Min, H., & Galle, W. P. (2001). Green purchasing practices of US firms. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(9), 1222–1238.
- Myers, J. H., & Alpert, M. I. (1968). Determinant buying attitudes: meaning and measurement. *Journal of Marketing*, 32(4), 13–20.
- Noci, G. (1997). Designing 'green' vendor rating systems for the assessment of a supplier's environmental performance. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 3(2), 103–114.
- Olugu, E. U., Wong, K. Y., & Shaharoun, A. M. (2011). Development of key performance measures for the automobile green supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 567–579.
- Ragatz, G. L., Handfield, R. B., & Scannell, T. V. (1997). Success factors for integrating suppliers into new product development. *The Journal of Product Innovation Management*, 14(3), 190–202.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.
- Saaty, T. L. (2001). *Decision-making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2002). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *Scientia Iranica*, 9(3), 215–229.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2013). *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks* (2nd baskı). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>
- Sarkis, J. (2001). Manufacturing's role in corporate environmental sustainability - Concerns for the new millennium. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(5/6), 666–686. <https://doi.org/10.1108/01443570110390390>

- Sarkis, J. (2003). A strategic decision framework for green supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 11(4), 397–409.
- Sarkis, J., & Rasheed, A. (1995). Greening the manufacturing function. *Business Horizons*, 38(5), 17.
- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K. (2011). An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 1–15.
- Shaik, M., & Abdul-Kader, W. (2011). Green supplier selection generic framework: a multi-attribute utility theory approach. *International Journal of Sustainable Engineering*, 4(01), 37–56.
- Sofres, T. N. (2001). The European survey on socially responsible investment and the financial community.
- SPN. (2007). Guide to the Business Case & Benefits of Sustainability Purchasing.
- T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2013). Beyaz Eşya Sektörü Raporu (2013/1).
- T.C. Gümrük ve Ticaret Bakanlığı. (2015). Beyaz Eşya Sektörü Raporu.
- Testa, F., Iraldo, F., Frey, M., & Daddi, T. (2012). What factors influence the uptake of GPP (green public procurement) practices? New evidence from an Italian survey. *Ecological Economics*, 82, 88–96.
- Topçu, Y. İ. (2019). Analitik hiyerarşi ve ağ süreci. www.ilkertopcu.net
- Tsui, C.-W., & Wen, U.-P. (2012). Developing the green supplier selection procedure based on analytical hierarchy process and outranking methods. *Proceedings of the 3rd International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 299–307.
- Uttam, K., Faith-Ell, C., & Balfors, B. (2012). EIA and green procurement: Opportunities for strengthening their coordination. *Environmental Impact Assessment Review*, 33(1), 73–79.
- Walker, H., & Brammer, S. (2012). The relationship between sustainable procurement and e-procurement in the public sector. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 256–268.
- Warner, K. E., & Ryall, C. (2001). Greener purchasing activities within UK local authorities. *Eco-Management and Auditing: The Journal of Corporate Environmental Management*, 8(1), 36–45.
- Yen, Y.-X., & Yen, S.-Y. (2012). Top-management's role in adopting green purchasing standards in high-tech industrial firms. *Journal of Business Research*, 65(7), 951–959.
- Zhou, R., Ma, X., Li, S., & Li, J. (2012). The green supplier selection method for chemical industry with analytic network process and radial basis function neural network. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 4(4), 147–158.
- Zhu, Q., Dou, Y., & Sarkis, J. (2010). A portfolio-based analysis for green supplier management using the analytical network process. *Supply Chain Management: An International Journal*, 15(4), 306–319. <https://doi.org/10.1108/13598541011054670>
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265–289.
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Geng, Y. (2005). Green supply chain management in China: pressures, practices and performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(5), 449–468. <https://doi.org/10.1108/01443570510593148>
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. (2007). Green supply chain management: pressures, practices and performance within the Chinese automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 15(11–12), 1041–1052.



ÇOK BİLEŞENLİ KALIPLAMA YÖNTEMİNE UYGUN SÜREKLİ ELYAFLI TERMOPLASTİK KOMPOZİT AKÜ TAŞIYICI PARÇASININ GELİŞTİRİLMESİ

Ayça KÜÇÜKOĞLU^{1*}, Gökçe ÖZYAPI¹, Atanur ACAR¹, Ali Ozan BAĞRIYANIK¹, Osman ÇOLPAN¹,
Hafize ÇELİK¹, Yavuz Emre YAĞCI²

¹ Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., R&D Center, Bursa, Türkiye

² Farplas A.Ş., R&D Center, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Çok Bileşenli Kalıplama,
Akü Taşıyıcı,
Sürekli Elyafli
Termoplastik Kompozitler,
Ağırlık Azaltma.*

Öz

Emisyon standartlarının sürekli geliştirilmesinden dolayı ağırlık azaltma bu standartları yakalama açısından önem kazanmıştır. Yakıt tüketimi ve performans iyileştirmeleri için maliyetleri kontrol altında tutarken tüm araç bileşenlerinin ağırlığını azaltmak, araç ağırlık azaltması için yenilikçi çözümlere yol açmıştır. Araç ağırlık azaltma çalışmalarında çelik yerine çelik kullanımını azaltmak için polimer kompozit malzemelerin kullanılması dikkat çekicidir. Farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan termoset malzeme bazlı kompozitler, üretim kısıtlamaları ve geri dönüşüm eksikliği nedeniyle binek araçların üretiminde yer bulamamıştır. Seri üretime uygun olarak üretilen ve aynı mekanik performanslarla geri dönüştürülen sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler, otomotiv sektöründe artan uygulamalar bulmaktadır. Bu çalışmada, araçlarda metal akü taşıyıcı kısmı yerine sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit akü taşıyıcı geliştirilmiştir. Bu çalışmada; yapısal olan taşıyıcı çelik bir akü taşıyıcı, hafifletme amaçlı sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelere uygun olarak tasarlanmış, sanal analizleri yapılarak üretilmiş ve araç başına 0.5 kg ağırlık azaltımı sağlanmıştır. Tasarım aşamasından itibaren parça için detaylı güvenlik, doğal frekans ve aşırı yüklenme analizleri yapılarak meydana gelen yüksek gerinim değerlerini azaltmak için iyileştirmeler yapılmıştır.

DEVELOPMENT OF A CONTINUOUS FIBER THERMOPLASTIC COMPOSITE BATTERY CARRIER BY USING OVERMOLDING PRODUCTION TECHNOLOGY

Keywords

*Over-Molding,
Battery Carrier,
Continuous Fiber
Thermoplastic Composites,
Lightweight.*

Abstract

In the last ten years, the problem of vehicle lightening has become the most crucial research topic in the automotive sector. Reducing the weight of all vehicle components, while keeping costs under control for fuel consumption and performance improvements, leads to innovative solutions for vehicle lightening. The use of polymer composite materials to reduce the use of steel instead of steel in vehicle lightening studies is noteworthy. Thermoset materials-based composites, which are widely used in different sectors, have not been able to find a place in the production of passenger vehicles due to production constraints and lack of recycling. Continuous fiber-reinforced thermoplastic composites, which are produced in accordance with mass production and are recycled with the same mechanical performances, are finding increasing applications in the automotive sector. In this study, continuous fiber-reinforced thermoplastic composites battery carrier will be developed in vehicles instead of the steel battery carrier part. The detailed mechanical analysis will be performed for the part from the design phase, and part will be formed by an injection-based thermoform production method. From the design phase, detailed safety, natural frequency and overload analyzes have been made for the part and improvements have been made to reduce the high strain values that occur.

* İlgili yazar / Corresponding author: ayca.kucukoglu@tofas.com.tr, +90-224-261-0350

Alıntı / Cite

Küçüköğlü, A., Özyapı, G., Acar, A., Bağrıyanık, A. O., Çolpan, O., Çelik, H., Yağcı, Y.E., (2020). Çok Bileşenli Kalıplama Yöntemine Uygun Sürekli Elyafli Termoplastik Kompozit Akü Taşıyıcı Parçasının Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1223-1235.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Küçüköğlü, 0000-0002-1053-6138
 G. Özyapı, 0000-0002-2398-5653
 A. Acar, 0000-0002-0945-0003
 A. O. Bağrıyanık, 0000-0002-8512-3450
 O. Çolpan, 0000-0003-0979-2799
 H. Çelik, 0000-0001-7572-073X
 Y. E. Yağcı, 0000-0003-0754-5540

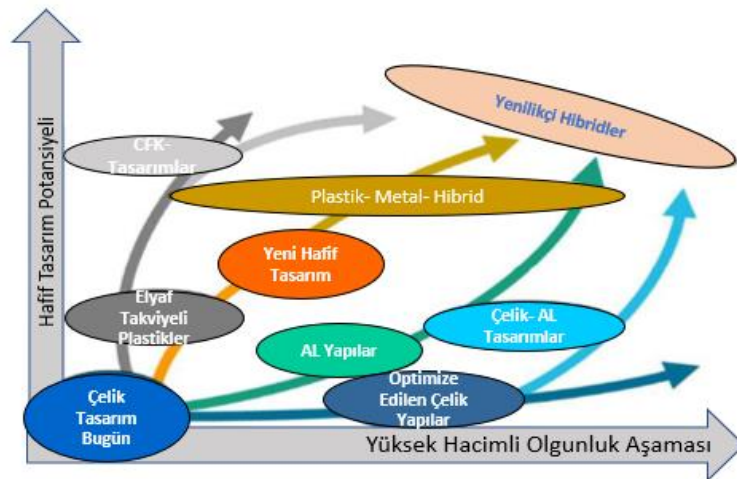
Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.04.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	17.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Dünya genelindeki ağır CO2 emisyon yönetmeliklerinden kaynaklı, otomotiv endüstrisinde önemli ölçüde ağırlık azaltılması ihtiyacı oluşmaktadır (Dings, 2012; European Environment Agency, 2018). Araç ağırlığındaki %10'luk bir azalma yakıt ekonomisinde %6-8 oranında iyileşme sağladığı da görülmüştür (Kazan, 2019). Araç ağırlık azaltılması, malzeme kombinasyonu, parça malzeme değişikliği ve tasarım optimizasyonu gibi yöntemlerle elde edilebilir. Özellikler plastik malzemeler otomotiv de sıklıkla kullanılan, üretimi kolay, korozyona dayanıklı ve hafif malzemelerdir (Swift vd., 2015).

Mevcutta kullanılan malzeme kombinasyonlarıyla yapılan birçok çalışmada seri üretime olgunlaştırma fazı uzun sürmekle beraber istenilen ağırlık azaltılmasına ulaşamamaktadır. Bu nedenle Şekil 1'de de gösterildiği gibi hafif ve yüksek hacimli yenilikçi hibrit yapılar ihtiyacı vardır (Kazan, 2019).



Şekil 1. Seri üretimde, ileri malzemelerle ağırlık hafifletme potansiyelleri (Kazan, 2019) (Lightweight potentials of advanced materials in mass production)

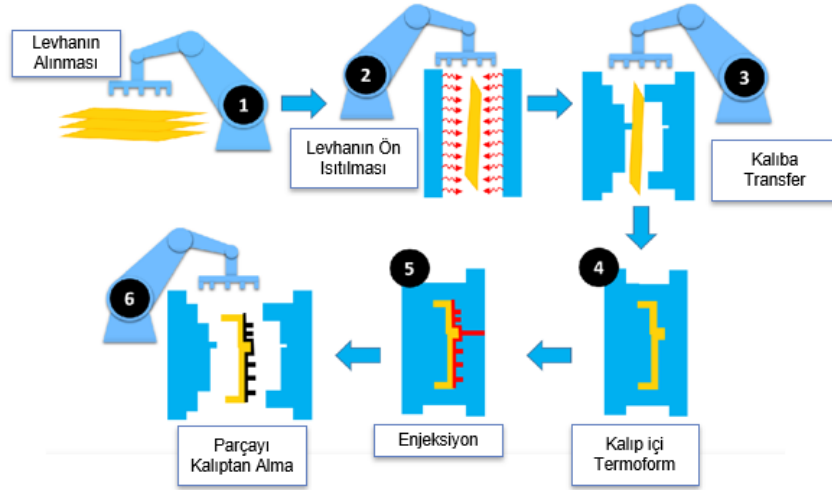
Termoset ve termoplastik kompozit malzemelerin dayanım, sertlik, korozyon dayanımı ve hafiflik gibi özellikleri metalik malzemelerle karşılaştırıldığında otomotiv, denizcilik ve havacılık sektöründe büyük ilgi çekmektedir (Mazumdar, 2001; Chawla vd, 1999). Ancak Termoset matrisli kompozit parçaların üretimi, uzun çevrim süreleri, zayıf kimyasal etkileri ve geri dönüşüm için uygun olmaması, kompozit sektörünü termoplastik matris kompozitlerine yönlendirmiştir (Abramovich, 2017). Şekil 2'de termoplastik malzemeden üretilen motor alt muhafaza parçası gösterilmektedir.



Şekil 2. Termoplastik kompozit motor alt muhafaza parçası (Dittmar ve Plaggenborg, 2019) (Thermoplastic composite engine under cover part)

Sürekli cam elyaf ve kısa cam elyaf malzemelerin bir araya getirildiği, çok bileşenli kalıplama teknolojisi kullanılan hibrit yapılar ilgi çekici hale gelmiştir. (Yaldız vd., 2016). Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemeler (CFRT), yüksek eğilme mukavemeti, darbe dayanımı ve kısa çevrim sürelerinde oluşabilme kabiliyetleri nedeniyle havacılık, savunma ve otomotiv endüstrilerindeki metal malzemelere alternatif malzemeler olarak öne çıkmaktadır (Fan ve Njuguna, 2016).

Çok bileşenli kalıplama teknolojisi ile kalıba elyaf takviyeli termoplastik bir levha yerleştirilerek ısıtılır, enjeksiyon kalıbı aracılığı ile ısıtılan levha ya ön şekil verilir ve uzun elyaf takviyeli termoplastik malzeme ribli bir yapı oluşturmak üzere enjekte edilmektedir (Bonefeld ve Obermann, 2012). Overmould kalıplama adımları; levhanın alınması, levhanın ön ısıtılması, kalıba transfer, kalıp için termoform, enjeksiyon, parçayı kalıptan alma ve levhanın alınması olarak 6 adımda sıralanmaktadır. Çok bileşenli kalıplama adımları Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Çok bileşenli kalıplama prosesi (Rietman vd., 2016) (Overmolding process)

Çok bileşenli kalıplama prosesinde, kompozit plakalar özel bir kavrama ünitesine (1) sahip bir robot tarafından alınır. Kompozit plaka, form alabilmesi için operasyon sıcaklıklarına kadar ısıtıldığı bir IR fırına (2) aktarılır. Kompozit plaka, ısıtıldıktan sonra, robot sıcak olan laminatı enjeksiyon kalıplarına aktarır ve içine yerleştirir (3). Bu kısımda, enjeksiyon kalıbının tamamen kapatılmasından önce plakayı istenen pozisyonda sabitleyen bir sisteme ihtiyaç vardır. Önceden ısıtılmış ve yerleştirilmiş plaka, enjeksiyon makinesinin (4) kapanma hareketi sırasında şekillendirilir. Kalıbın tamamen kapatılmasından ve kalıp kapanma kuvvetinin uygulanmasından sonra kalıp, enjeksiyon, tutma ve soğutma aşamalarını (5) içeren standart bir enjeksiyon kalıplama prosedürü kullanılarak doldurulur. Aşırı kalıplanmış reçine ve sürekli fiber plaka arasında iyi yapışma özelliklerini güvence altına almak için kompozit plakanın yüzey sıcaklığı hala yeterince yüksek olmalıdır. Soğuduktan sonra parça çıkarılır (6) ve bir sonraki döngü başlayabilir. Bir üretim ortamında, döngü süresi esas olarak enjeksiyon kalıplama döngüsüne bağlıdır, çünkü laminatın ısıtılması genellikle paralel olarak gerçekleştirilmektedir (Rietman vd., 2016).

Otomotiv sektöründe, termoplastik malzeme ve çok bileşenli kalıplama teknolojisi ile çeşitli komponentlerin geliştirme ve üretim çalışmaları yapılmaktadır. Şekil 4’de yer alan airbag modülü parçası ve Şekil 5’de yer alan fren pedalı parçaları sürekli elyaf takviyeli termoplastik malzemelerin enjeksiyonla kalıplanmış uygulamalarıdır (Sherman, 2012).

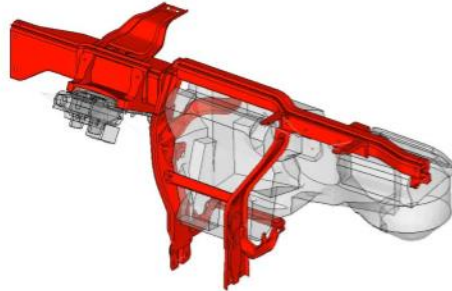


Şekil 4. Airbag modülü (Airbag module)

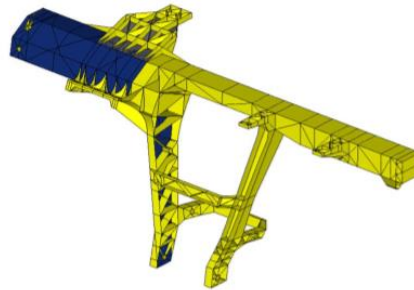


Şekil 5. Fren pedalı (Brake pedal)

Schijve ve Kulkarni (2016) çalışmalarında yaklaşık 20 farklı metal parçadan oluşan torpido iskeletinin sürekli elyaf takviyeli kompozit malzeme ile aynı hacimde yer kaplayacak şekilde tasarlandığını belirtmişlerdir.



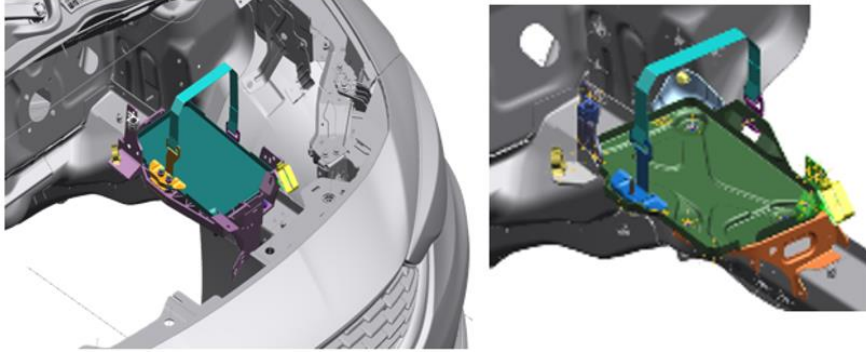
Şekil 6. Metal torpido iskeleti (Metal torpedo frame)



Şekil 7. Kompozit torpido iskeleti (Composite torpedo frame)

Yapılan diğer çalışmalara göre bu çalışmada, parçanın akü gibi önemli bir parçayı taşımasının yanı sıra, önden çarpmalarda direk darbeye maruz kalmasına rağmen aküyü yerinde tutabilmesi ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca parçanın motor bölgesinde bulunması sebebiyle araç üzeri yerleşiminde birçok kısıt mevcuttur. Bu nedenle akü taşıyıcı parçası hacim olarak çok kısıtlı bir bölgede hem gerekli taşıma işlevini sağlayan hem de önden çarpışmada meydana gelen darbe kuvvetini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Hem tasarım gerekliliklerini yerine getirmek hem yapısal hem de çarpışma yeterliliklerine erişebilmek için uzun süren tasarım ve doğrulama aktiviteleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmaya konu olan akü taşıyıcı araçta motor kaputunun altında bulunmaktadır ve aküye bir kayışla bağlanmaktadır. Şekil 8'de akü taşıyıcı parçasının araç üzeri yeri gösterilmektedir. Akü taşıyıcı parçası aküde olabilecek asit sızıntısında çevre ve altındaki parçaların paslanmasını önlemek için asit sızıntısını üzerinde toplayarak ilgili alandan uzaklaştırmaktır. Akü taşıyıcılar motor ve yolcu bölümlerine yerleştirilebilmektedir. Motor ve yolcu bölümlerine yerleştirilen akü taşıyıcı karşılaştırıldığında yolcu bölümüne yerleştirilen akü sepetinin daha ulaşılır olduğu ve çarpışma durumunda daha az etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Ancak akü sepetinin yolcu bölümünde tercih edilmeme sebebi bagaj bölgesinde bu sisteme yer açılması için yedek lastik iptal edilmesi gerekliliğidir.



Şekil 8. Akü taşıyıcı parçasının araç üzeri yeri (Location of the battery carrier part on the vehicle)

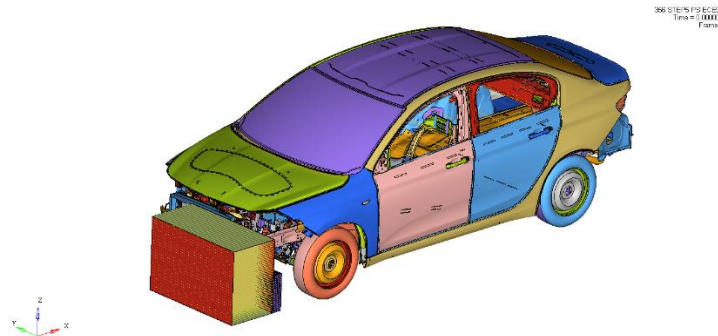
Plastik akü sepeti, şasi kolundaki 2 metal braketle araca sabitlenmektedir. Plastik akü sepeti üzerinde taşabilen asit, parçadaki kanallardan asit tahliye hortumuna taşınmaktadır. Akü taşıyıcı kısmı metal formda 1,75 kg ağırlığındadır ve 7 farklı metal parçadan oluşmaktadır. Mevcut 7 farklı metal parçadan oluşan akü taşıyıcı parçası, bir kalıpta plastik enjeksiyon işlemi ile kalıplanabilir. Bu, montajı gereken parça sayısını ve metal parça ile ilgili montaj adımlarını ve parça maliyetini azaltmaktadır. Bu çalışmada yapısal olan taşıyıcı çelik bir parça, hafifletme amaçlı sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelere uygun olarak tasarlanmış ve sanal analizleri yapılarak üretilerek araç başına 0.5 kg ağırlık azalmasına sağlanmıştır.

2. Parça Tasarımı ve Sayısal Analiz (Part Design and Finite Element Analysis)

İlk tasarımda kompozit tasarımı, malzemenin sanal modellenmesi ve taşıyıcının tam ölçekli araca monte edildikten sonraki davranışı üzerine yoğunlaşmıştır. Mevcut metal akü taşıyıcıya benzer tasarıma ek olarak sürekli cam elyafli kompozit malzemesi birleştirilerek yeni bir tasarım elde edilmiştir. Kompozit akü taşıyıcı için belirlenen hedefler doğrultusunda modal analizi, görev yükleri, aşırı yüklenme durumları ve çarpma testleri yapılmıştır. Tasarım süreci analizler ile koordinasyonlu bir şekilde iteratif olarak ilerletilmiştir.

2.1. Çarpışma Analizleri (Crash Analysis)

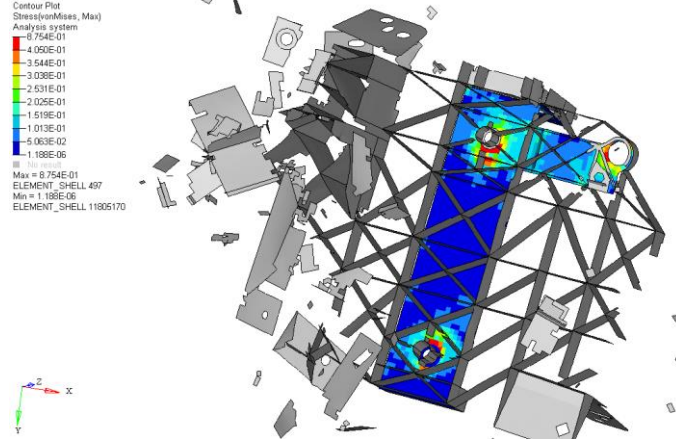
Güvenlik doğrulama çalışmaları için ECE 94 analizleri ile başlanmıştır. Ece 94 önden çarpma testi M1 sınıfı araçlar için yapılması zorunlu tutulan bir testtir. Araçlar bu testi geçmeden satılabilir onayı alamamaktadır. Bu testin yapılma koşulları ise Avrupa Araç Güvenliği Arttırma komisyonu tarafından belirlenir. Testin amacı şekil 9'daki gibi 56 km/h hıza sahip bir aracın aynı kütleye sahip başka bir otomobile çarpması sonucu araç içindeki sürücü ve yolcuların zarar görmemesini göstermektir. Şekil 9'da Ece 94 önden çarpma testi gösterilmektedir.



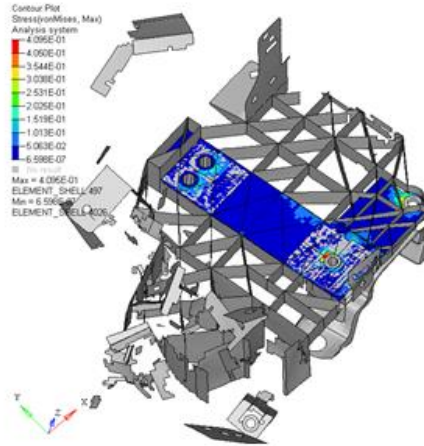
Şekil 9. Ece 94 önden çarpma testi (ECE 94 Frontal crash test)

Analizler Ls-Dyna yazılımı ile zamana bağlı (explicit) olarak tamamlanmıştır. Analizde araç modeli 56 km/h hız ile araca göre %40 ötelenmiş olarak pozisyonlanan ve deforme olabilen bir bariyere çarpıtılmaktadır. Bu proje için testten beklenti; akü taşıyıcının bağlantılarının kopmasının engellemek ve bu sayede akünün hareketini kısıtlayarak serbestçe motor boşluğunda dolaşmasını engellemektir.

Geliştirilen tasarımla motor takozuna bağlanan braketin kemer tokasıyla bağlanmış feder yapılarında da farklılığa gidilmiş ve sürekli cam elyafli kompozit malzemesinin arka bağlantısına uzanan kısmı duvar sınırına kadar genişletilmiştir. Ayrıca ilk durumda bağlantı bölgesinde görülen yüksek gerinim değerini azaltmak için ikili bağlantıya geçilmiştir. Parçanın ECE 94 analiz öncesi durumu Şekil 10'da, ECE 94 analizi sonrası durumu Şekil 11'de gösterilmektedir.



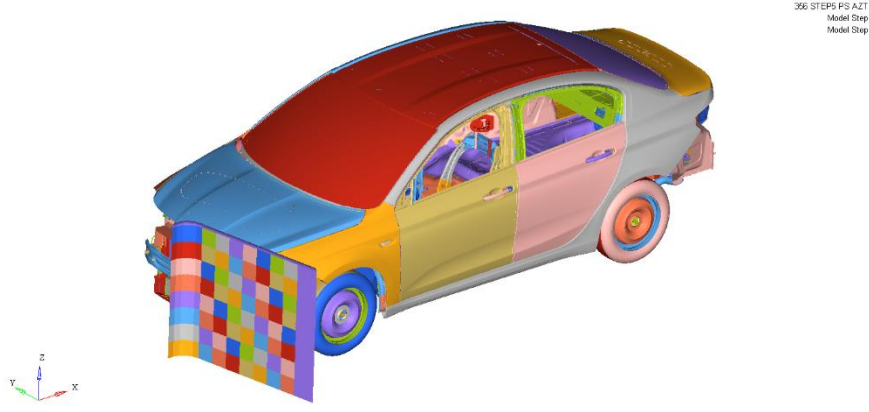
Şekil 10. ECE 94 analizi ilk durum (First result of frontal crash analyses)



Şekil 11. ECE 94 analizi son durum (Final result of frontal crash analyses)

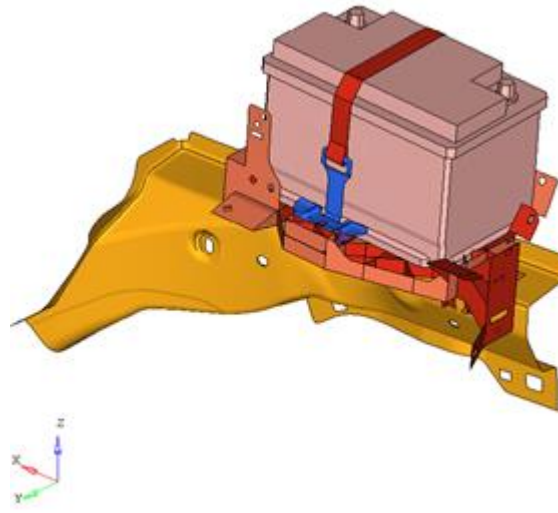
Şekil 11'de görüldüğü üzere tasarımdaki bağlantılar oldukça iyi durumdadır ve gerilim değerleri sınır değerine çok yakındır. Kısa cam elyafli termoplastik malzemeli feder yapıda kopma başlangıcı görülmektedir. Fakat performans açısından kabul edilebilir seviyededir. Ece 94 (Regulation No.94) analizinin tekrarlanması için üretilebilir bir CAD datası oluşturularak analiz tekrarlanmıştır.

Sigorta analizlerindeki temel amaç, aracın değiştirilemeyen (BIW'da yer alan ya da araca kaynak ile bağlı) parçalara zarar gelip gelmediğini belirlemektir. Sigorta çarpma analizlerinde araç, 16kmh (+-1kmh) hızla %40 ötelenmiştir ve 10 derece açılmış rijit bir duvara Şekil 12'deki gibi çarpıtılmaktadır (RCAR).

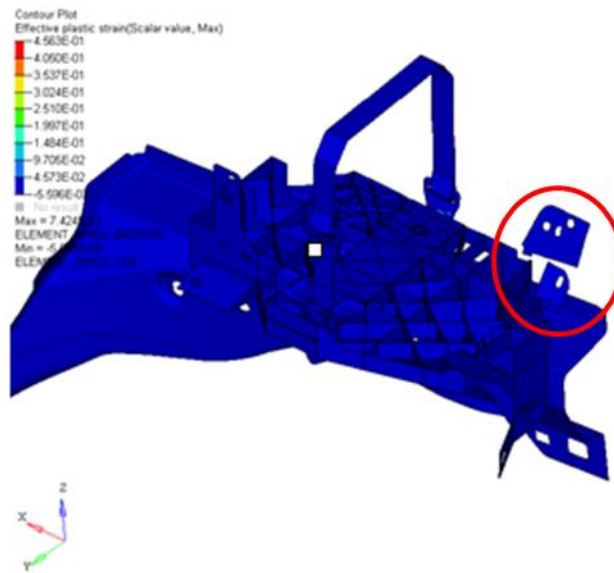


Şekil 12. Sigorta çarpma analizi (Insurance crash test)

ECE94 analizinden olumlu sonuçlar alındığı için güvenlik testlerinden ECE94'e göre daha hafif bir test olan sigorta çarpma testi için de analiz yapılmıştır.



Şekil 13. Sigorta Çarpma analizinde akü taşıyıcı deformasyonu (Deformation of battery carrier after insurance test)

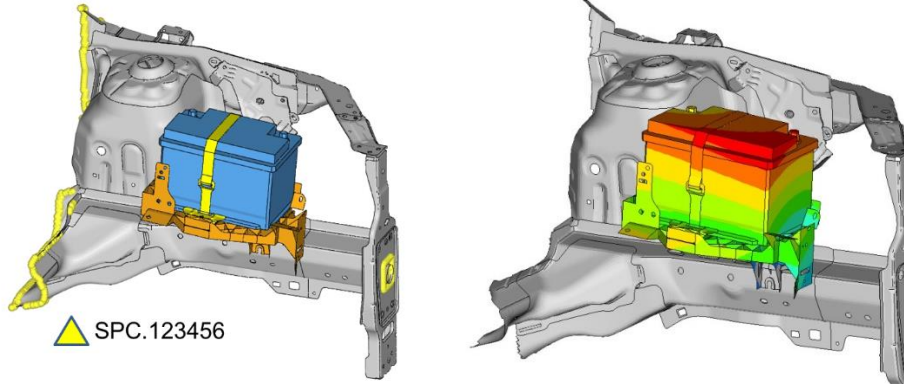


Şekil 14. Sigorta Çarpma analizinde akü taşıyıcı gerinim dağılımı (Strain distribution after insurance test)

Şekil 13’de deformasyon şekli ve Şekil 14’de gerinim dağılımı gösterilmiştir. Sigorta çarpma testinden beklenti parçanın deformasyona uğramaması ve parçanın olası bir kazada değiştirilmemesidir. Burada sol ön kısımda plastik parçada kopma durumu söz konusudur. Şekil 11’de görüleceği üzere parça üzerinde bir deformasyon oluşmamakta sadece ön kısımda bulunan elektrik kablo tutucu plastik parçada kopma durumu söz konusudur. Bu nedenle tasarımda kablo bağlantı yeri değiştirilmiştir.

2.2. Modal Analiz (Modal Analysis)

Güvenlik analizleriyle pozitif sonuçlar alındıktan sonra statik analizlere geçilmiştir. Parçanın doğal frekansı hesaplanmıştır. Model akü grubu ve bağlantılarını içerecek şekilde kesilmiş ve kesildiği bölgelerden her yönde öteleme ve dönme serbestlikleri kısıtlanarak doğal frekans analizi yapılmıştır. Analizde lineer malzeme özellikleri kullanılmıştır. Kompozit akü taşıyıcıdan beklenen doğal frekans değeri A Hz’den büyük olmasıdır. Sınır koşulu ve analiz sonucu Şekil 15’de gösterilmiştir.



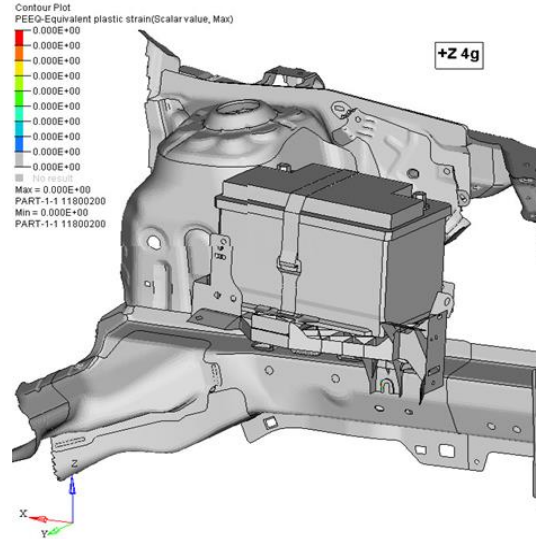
Şekil 15. a) Modal analiz sınır koşulu (Modal analysis boundary conditions) b) Modal Analiz sonucu (Modal analysis result)

Analiz sonucuna göre akü taşıyıcının doğal frekansı 0.87A Hz olarak hesaplanmıştır. Bu analizin hedefi akü taşıyıcının doğal frekansının A Hz veya daha büyük olması şeklinde belirlenmiştir. Hesaplanan A Hz değeri hedef değere çok yakın olduğu için sonuçlar pozitif olarak yorumlanmıştır.

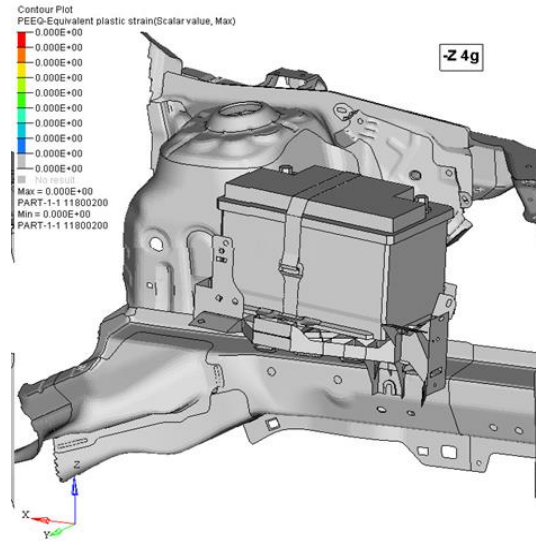
2.3. Görev Yükleri (Mission Loads)

Bu yüklerin belirlenmesinde araç yol testinde aracın maruz kaldığı “g” kuvvetleri dikkate alınmıştır. Sınır koşulu modal analiz ile aynıdır. Statik olarak ivmeler uygulanmıştır. Kalıcı deformasyon durumu incelendiği için analizlerde plastik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Görev yükleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Bu yüklemelerde hedef akü taşıyıcı üzerinde plastik deformasyon oluşmamasıdır. Buradaki amaç aracın ömrü boyunca parçada oluşabilecek hasarların incelenmesi ve elimine edilmesidir. Uygulanan kuvvetler Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21’de sıralanmıştır.

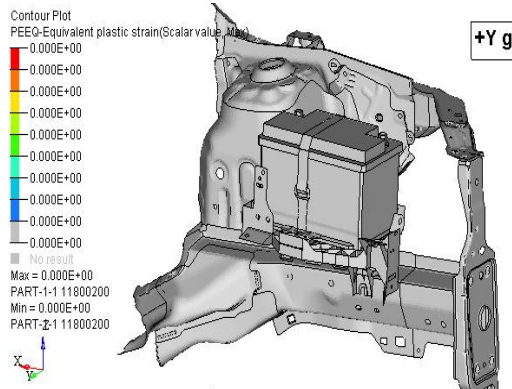
- -Z yönünde 4g ivmelenme
- +Z yönünde 4g ivmelenme
- +Y yönünde 1g ivmelenme
- -Y yönünde 1g ivmelenme
- +X yönünde 1g ivmelenme
- -X yönünde 1g ivmelenme



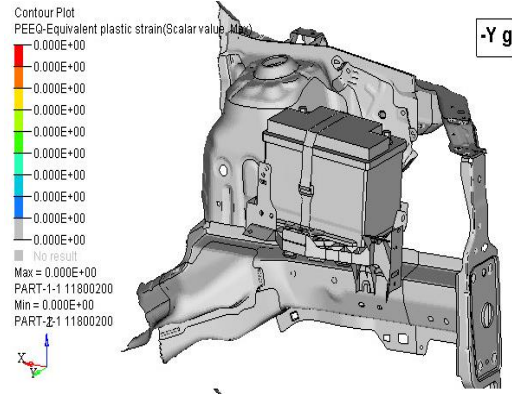
Şekil 16. +Z yönünde 4g ivmelenme (Acceleration 4g in +Z)



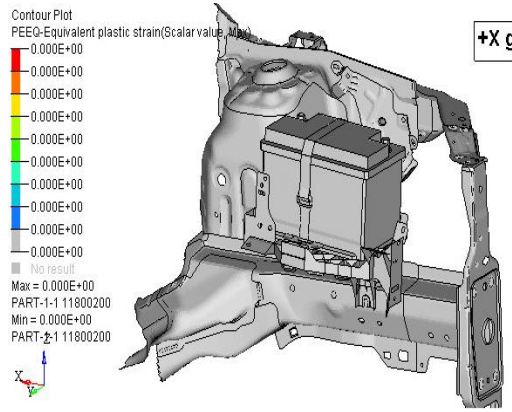
Şekil 17.- Z yönünde 4g ivmelenme (Acceleration 4g in -Z)



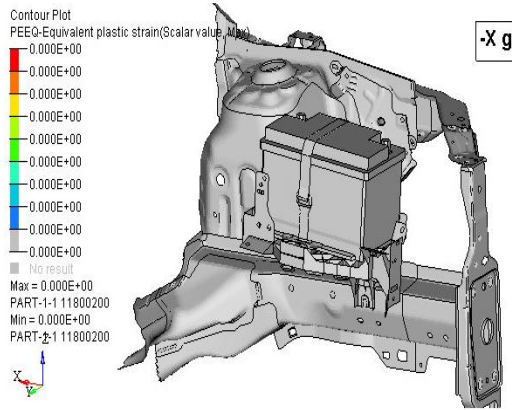
Şekil 18. +Y yönünde 1g ivmelenme (Acceleration 1g in +Y)



Şekil 19.- Y yönünde 1g ivmelenme (Acceleration 1g in -Y)



Şekil 20. +X yönünde 1g ivmelenme (Acceleration 1g in +X)



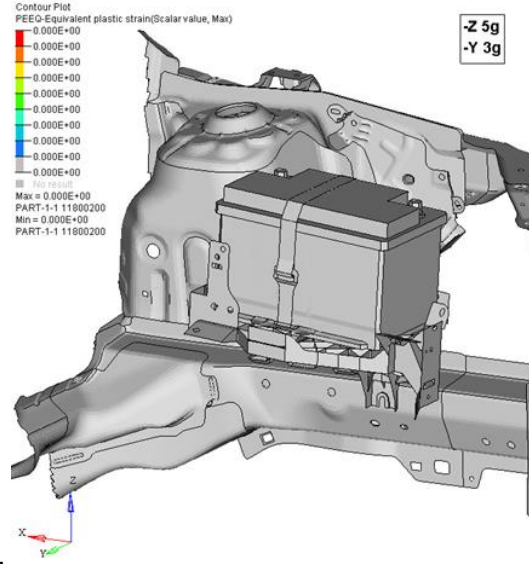
Şekil 21.- X yönünde 1g ivmelenme (Acceleration 1g in -X)

Kompozit akü taşıyıcı üzerinde görev yükleri uygulandığında herhangi bir kalıcı gerinim hesaplanmamıştır bu nedenle sonuç pozitif olarak değerlendirilmektedir.

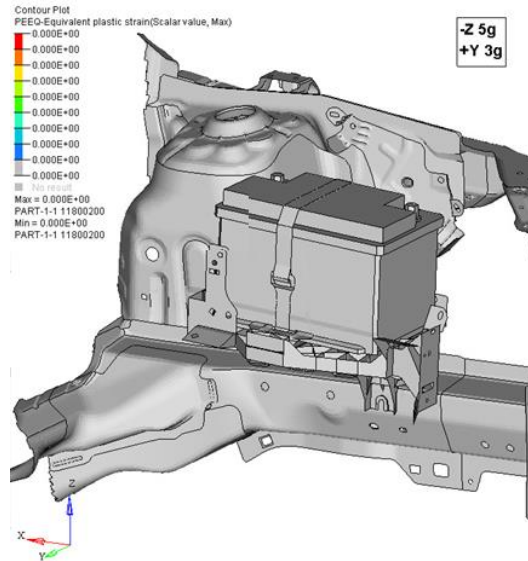
2.4. Aşırı Yükleme Durumları (Excessive Loading Conditions)

Aşırı yükleme durumları; aracın denizde taşınma gibi aşırı yüklemelere maruz kalacağı durumlarda, üstünde oluşacak deformasyonları görebilmek için incelenmektedir. Analizde sınır koşulu ve model detayları, görev yükü analizleri ile aynıdır. Uygulanan yükler Şekil 22, Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25’de verilmiştir. Bu yüklemeler için hedef, parça üzerinde plastik gerinim oluşmamasıdır.

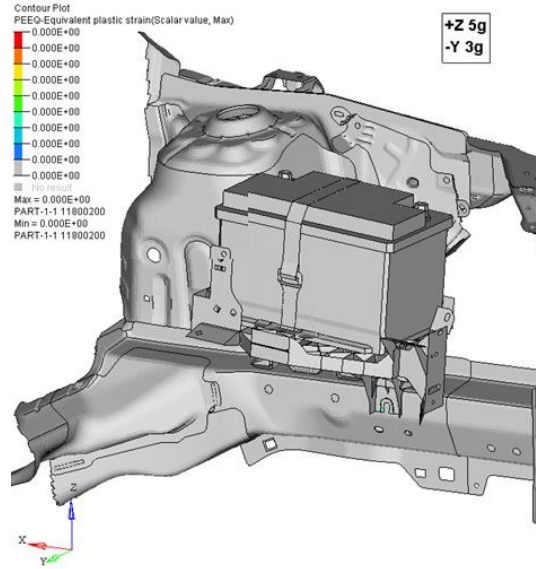
- Aşırı Yükleme durumları, Gemiyle taşınma durumları
 - +Z yönünde 5g ve -Y yönünde 3g ivmelenme
 - -Z yönünde 5g ve -Y yönünde 3g ivmelenme
 - +Z yönünde 5g ve +Y yönünde 3g ivmelenme
 - -Z yönünde 5g ve -Y yönünde 3g ivmelenme



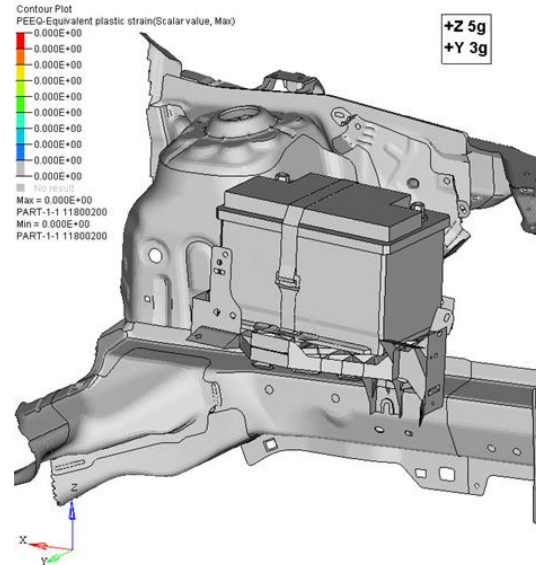
Şekil 22. +Z yönünde 5g, -Y yönünde 3g ivmelenme (Acceleration 5g in -Z, 3g in -Y)



Şekil 23. -Z yönünde 5g, +Y yönünde 3g ivmelenme (Acceleration 5g in -Z, 3g in +Y)



Şekil 24. +Z yönünde 5g, -Y yönünde 3g ivmelenme (Acceleration 5g in +Z, 3g in -Y)



Şekil 25. +Z yönünde 5g, +Y yönünde 3g ivmelenme (Acceleration 5g in +Z, 3g in +Y)

Analiz sonuçlarına göre aşırı yükleme durumlarında parça üzerinde kalıcı deformasyon hesaplanmamıştır. Buna göre sonuçlar pozitif olarak değerlendirilmiştir.

3. Sonuçlar (Results)

Çelik malzeme araç gövdesinde kullanılan en yaygın malzeme olmasına rağmen, otomotiv üreticileri CO2 emisyonlarını azaltmak için alternatif malzemeler kullanarak araç ağırlığını azaltmaya gitmiştir. Yüksek mekanik ve kimyasal özelliklere sahip kolay geri dönüştürülebilir ve kısa şekillendirme süresine sahip CFRT malzemeler başarılı bir alternatif olarak sunulmaktadır. Bu çalışmada yapısal taşıyıcı çelik bir parça, hafifletme amaçlı sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelere uygun olarak tasarlanmış, tasarımlar sayısal analiz yöntemleri ile incelenmiş ve gerekli tasarım faaliyetleri ile zayıf noktalar iyileştirilmiştir. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzeme ile akü taşıyıcı parçası tasarlanmış sanal analizleri yapılarak üretilmiştir. CFRT malzemesi, akü taşıyıcı tasarımının araç başına 0.5 kg ağırlık azalmasına ulaşması ve aynı zamanda çarpma ve aşırı yükleme testlerinde görülebilecek, delik çevrelerindeki gerinim birikmelerini önleyip araç performansında kayıp olmaması için kullanılmıştır. Çok bileşenli kalıplama yöntemine uygun sürekli elyafli termoplastik kompozit akü taşıyıcı parçasının geliştirilmesi ile araç performansından kayıp olmadan araç başına 0.5 kg ağırlık azaltımı sağlanmıştır. Bu çalışma aracılığıyla benzer yapıdaki malzemeler araç kapı içi mekanizmaları, araç arka tabanı gibi parçalara uygulanarak çalışma alanı genişletilebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu) tarafından 3140681 Proje Numarası ile desteklenmiştir. Proje boyunca sağladığı finansal destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abramovich, H., 2017. Introduction to Composite Materials. Stability and Vibrations of Thin Walled Composite Structures, 1-47.
- Bonefeld, D., Obermann, C., 2012. A Hybrid Technique for Serial Production of 3D Parts of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics. ECCM15 - 15TH European Conference on Composite Materials, Venice.
- Chawla, K. K., Meyers, M. A., 1999. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press 2017, 651-673.
- Dings J, 2012. How Clean Are Europe's Cars?. An Analysis of Carmaker Progress Towards EU CO2 Targets In 2011, 6-9, <http://www.transportenvironment.org/> European Federation for Transport and Environment.
- Dittmar H., Plaggenborg H., 2019, Lightweight Vehicle Underbody Design. Reinforced Plastics, 63, 29-32.
- European Environment Agency., 2018. Monitoring CO2 Emissions from New Passenger Cars and Vans in 2017. EEA Technical Report, 15, 1-35.
- Fan, J., Njuguna, J., 2016. An Introduction to Lightweight Composite Materials and Their Use in Transport Structures. Lightweight Composite Structures in Transport, Design, Manufacturing, Analysis and Performance, 3-34.
- Kazan, H., 2019. Hybrid Single Shot Manufacturing of MultiMaterials Structure for Automotive Applications. Phd Thesis of Clemson University.
- Mazumdar, S. K., 2001. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering, 1-17.
- RCAR, Research Council for Automobile Repairs.
- Regulation No.94. Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Protection of the Occupants in the Event of a Frontal Collision.
- Rietman B., Boxus E., Muhammad K. S., Verghes, N., 2016. Manufacturing Solutions for Hybrid Overmolded Thermoplastic Ud Composites, 3-4.
- Schijve W., Kulkarni S., 2016. New Thermoplastic Composite Solutions Present Viable Options for Automotive Lightweighting
- Sherman, L. M., 2012. The New Lightweights: Injection Molded 'Hybrid' Composites Spur Auto Innovation. <https://www.ptonline.com/articles/the-new-lightweights-injection-molded-hybrid-composites-spur-auto-innovation>
- Swift, T. K., Moore, M., Sanchez, E., 2015. Plastics and Polymer Composites in Light Vehicles. Economics and Statistics Department/American Chemistry Council.
- Yaldiz R., Schijve W, Muhammad K. S., 2016. Innovative Predictive Solutions for Hybrid Thermoplastic Composite Technology. 16th SPE Automotive Composites Conference, Sept. 2016, Novi, MI, USA.



MARKOV MODEL TABANLI ÇİFT ENSTRUMANLI MÜZİK BESTELEME

Muratcan KILIÇ, H. İrem TÜRKMEN*

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Markov Model,
Otomatik Müzik Besteleme,
Çift Enstrüman.

Öz

Müzik, tarih boyunca insan eliyle üretilen tonlar dizilimi olarak gerçekleşmiştir. Son altmış yılda müziğin otomatik olarak bilgisayarlar yardımıyla bestelenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, müziğin otomatik olarak üretilmesinde Markov süreci yaklaşımının kullanıldığı özgün bir müzik besteleme sistemi, EMERSON, sunulmuştur. EMERSON'ın insan yapımı müziklerin performansına ne kadar yaklaşabileceğinin tahlili yapılmıştır. Bunun için önerilen sistemde literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak iki enstrümanlı parçalar üretilmiştir. Birinci enstrümanın eğitiminde bir insan yapımı beste, ikinci enstrümanın eğitiminde birinci enstrümanın müzik sekansı kullanılmıştır. Üretilen müziklerin performansı anket yoluyla ölçülmüştür. Anketin Turing testi kısmında %43.32 oranında başarı oranı, beğeni testinde ise 10 üzerinden ortalama 5.62 puan elde edilmiştir.

COMPOSITION OF MUSIC WITH DUAL INSTRUMENTS BASED ON MARKOV MODEL

Keywords

Markov Model,
Automated Music
Composition,
Dual Instruments.

Abstract

Music has been implemented as a human-made sequence of tones throughout the history. In the last sixty years, there are ongoing studies about automated composition of music by computers. In this study, we propose a novel system, referred to as EMERSON, which exploits Markov process in order to perform automated composition of music. It has been analyzed that whether automatic composed music is approximated or not to the performance of the human-made music. For this purpose, differently from the works in technical literature, two-instrument pieces are generated by the proposed study. First instrument sequence is trained by using human-made composition while sequence of second instrument is trained by using the produced sequence of the first instrument. Performance evaluation of generated music is performed by surveying. In the Turing test part of survey it has been achieved 43.32% success rate, whereas in liking test a success rate of 5.62 points out of 10 is calculated.

Alıntı / Cite

Kılıç, M., Türkmen, H. İ., (2020). Markov Model Tabanlı Çift Enstrümanlı Müzik Besteleme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1236-1247.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Kılıç, 0000-0003-2172-5716
H. İ. Türkmen, 0000-0002-8690-0725

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	28.04.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	30.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

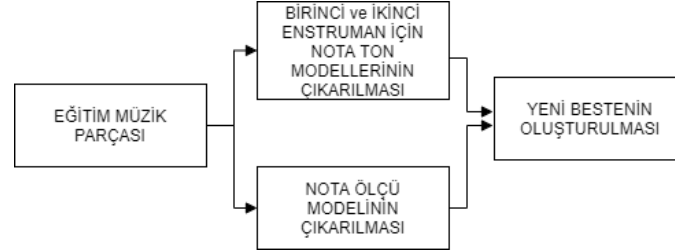
Müzik, insanlık tarihinin başından beri uygulanan, sesin estetiği üzerine kurulmuş, sanatın en eski dallarından biridir. Tarih boyunca müzisyenler müziğin nasıl geliştirilebileceği ve otomasyona dayalı matematiksel bir teknikle nasıl işlenebileceği sorusuna odaklanmış, bu amaçla çeşitli altyapılar, prosedürler, algoritmalar ve istatistiksel yöntemler geliştirmişlerdir. Bu konuda ilk olarak, Wolfgang Amadeus Mozart ve Franz Joseph Haydn

* İlgili yazar / Corresponding author: irem@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5763

1793 yılında zar atmaya dayalı, bilinen en eski "otomatik" müziklerden birisini geliştirmiştir(Hedges, 1978). Elektronik bilgisayarların icat edilmesi ve gelişmesiyle birlikte bu çalışmalar hız kazanmış ve daha farklı bir boyut almıştır.

Bu çalışmada ikinci mertebeye Markov süreci kullanılarak bilgisayar tarafından otomatik olarak müzik bestelenmesi sağlanmıştır. Sürecin zaman içinde geliştirilmesi ile müzik besteciliğinde kullanılan sezgisel prosedürlerin ne dereceye kadar matematiksel olarak ifade edilebileceğinin gözlemlenmesi hedeflenmektedir.

Markov tabanlı çift enstrümanlı otomatik müzik besteleme sisteminin çalışma adımları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sistem Akış Diyagramı (System Flow Diagram)

Önerilen sistemde eğitim için kullanılacak müzik parçasının nota geçiş özellikleri kullanılarak birinci ve ikinci enstrüman için Markov nota ton modelleri çıkartılmaktadır. Çalışma çift enstrümanlı müzik bestelemektir. Bu amaçla, ikinci enstrümanın modeli çıkartılırken birinci enstrümanın modelinden yararlanılmaktadır. Eş zamanlı olarak, eğitim parçasının nota ölçülerinden her iki enstrüman için de kullanılacak nota ölçü modeli oluşturulur. Son aşamada elde edilen modeller kullanılarak çift enstrümanlı müzik besteleme işlemi tamamlanır.

Çalışma, diğer otomatik müzik besteleme algoritmalarından farklı olarak Markov sürecinde ikinci bir enstrümanın dahil olmasıyla kendisini eğitim verisine göre yazmak yerine birinci enstrümanın gidiş şekline göre yazmaktadır. Bunu sağlamak için Markov sürecinin eğitiminde birinci enstrümanın çıkış verisi ikinci enstrümanda tekrar girişte kullanılmaktadır.

Bu makalede müzik teorisiyle ilgili terimler kullanılmıştır. Çalışmanın daha rahat anlaşılabilmesi adına bu terimlerin kısaca açıklanmasına ve oluşturulan müzik parçalarından örneklere Ek Materyal bölümünden ulaşılabilir. İkinci kısımda bu çalışmadan önce yapılmış çalışmalar incelenmiş, yapılmış olan çalışmayı ne derecede etkilediği ve çalışmaya nasıl bir katkısı olduğu belirtilmiştir. Üçüncü kısımda Markov sürecinin çalışmada nasıl kullanıldığı anlatılmış ve algoritma detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Dördüncü kısımda Turing testi ve beğeni testi metodları kullanılarak otomatik olarak üretilen müziklerin performansları ölçülmüştür. Son kısımda alınan sonuçlar değerlendirilerek önerilen modelin ileride yapılacak çalışmalara katkısı irdelenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bilgisayar tarafından üretildiği bilinen ilk müzik örnekleri; Push Button Bertha(Ames, 1987), ILLIAC Suite ve(Westergaard & Hiller, 1959) Computer Cantata olmuştur(Lejaren A. Hiller and Robert A. Baker, 1964). Push Button Bertha, Adventure Tomorrow isimli bir programda, 9 Ağustos 1956 tarihinde canlı olarak sunulmuştur(Ariza, 2011).

Yapılan çalışmalarda müzik teorisine bağlı olan birçok parametre uygulamaya geçirilmiştir. Bunlar arasında ölçü çizgisi, zaman işareti, tempo (Roig, 2014), oktav, akorlar (Muñoz, 2016; Roig, 2018), sus notası (Colombo, 2016) yer almaktadır. Bu çalışmalarda iki farklı yaklaşım benimsenmiştir (Herremans, 2015): Olasılıksal modeller (Roig, 2014; Van der Merwe, 2011; Toivanen, 2013; Mazurowski, 2012; Salas, 2011; Holtzman, 1981; Tanaka, 2010; Lo & Lucas, 2006) ve optimizasyona dayalı modeller (Muñoz, 2016; Colombo, 2016; Puente, 2002; Burton, 1999; Hornel, 1998; Chen, 2001). Bunlara ek olarak bu iki yapıyı birlikte kullanan çalışmalar da yayınlanmıştır (Herremans, 2015; Boenn, 2011).

Olasılıksal modeller arasında farklı yöntemler kullanılmıştır. Üretici gramerler (Salas, 2011; Holtzman, 1981) doğal dil işleme yaklaşımıyla müzik üretimidir ve müzik notalarının bir alfabe olarak kabul edilip anlamsallık oluşturulması yoluyla çalışmaktadır. Olasılıksal modeller arasında yaygın olarak kullanılan Markov zincirleri (Tanaka, 2010; Lo & Lucas, 2006) ve N-gram tabanlı sistemler (Roig, 2018) önceki olasılıksal geçişlere göre sonraki olasılıksal geçişlere karar veren modellerdir.

Optimizasyona dayalı modeller olasılıksal modellere göre daha güncel uygulamalardır ancak daha yüksek hesaplama karmaşıklığı gerektirmektedir. Yaygın olarak kullanılan optimizasyona dayalı modeller arasında rastgele bir başlangıç setinden optimizasyon formülüne bağlı olarak gelişen genetik algoritmalar (Muñoz, 2016; Puente, 2002; Burton, 1999) ve yapay sinir ağları (Colombo, 2016; Hornel, 1998; Chen, 2001; Zha, 2019) dikkat çekmektedir.

Literatürdeki çalışmaların bazıları değerlendirme için insanların görüşüne tabi tutulmuştur. Roig ve ekibinin önerdiği modelin anket çalışması ortalama %64 başarı elde ederken (Roig, 2018), Van Der Merwe'nin anket çalışması %38 başarı oranı elde edebilmiştir (Van der Merwe, 2011). Bu testlerde, kişilere kısa müzik kesitleri dinletilmiş ve bu kesitlerin insana mı, yoksa bilgisayara mı ait olabileceği sorulmuştur. Bilgisayara ait bir kesitin insan yapımı sanılması miktarı ile dinletilen müzik miktarı arasındaki oran başarı ölçütü olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmada önerilen sistem olasılıksal bir model olan Markov zincirlerini kullanmaktadır. Olasılıksal modellerin implementasyonu, optimizasyona dayalı modellere göre daha az hesaplama karmaşıklığına sahiptir.

Roig ve ekibi (Roig, 2018) homojen olmayan bir Markov modeli uygulamıştır. Bu modelde Markov zincirinin geçiş matrisi iki boyutlu değil, üç boyutludur. Üçüncü boyutta nota vuruşları arasındaki geçişler de incelenmiştir. Papadopoulos'un bir çalışmasında Markov zincirlerinin intihale yol açabileceğine ve bunun nasıl önlenebileceğine dair fikirler yer almaktadır (Papadopoulos, 2014). Markov modeli kullanan Tanaka ve ekibinin çalışmasında (Tanaka, 2010) ritim geçişleri insanlar tarafından önceden tanımlanmış kalıplarla oluşturulmuştur.

Markov zincirlerinin tercih edilmesindeki nedenler arasında Markov zincirlerinin istatistiksel doğasının müziğin yapısına uygunluğu yer almaktadır. Müzik, bilgisayarda her notanın bir durum, ve her nota geçişinin bir durum geçişi olarak kabul edilmesiyle modellenir. Üstelik, hesaplama karmaşıklığının ikinci derece için küçük olması, eğlence sektörüne yönelik mobil uygulamalarda kullanılmasında avantaj sağlamaktadır.

Önerilen çalışmanın otomatik müzik besteleme literatürüne üç temel katkısı bulunmaktadır:

- Birbirinden etkilenen iki enstrümanlı müzik bestelerinin, tek enstrüman veya birbirinden bağımsız enstrümanlar kullanılarak üretilen bestelere göre daha başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir.
- Eğitim için kullanılacak beste uzunluğunun üretilen bestenin başarısına etkisi ortaya konulmuştur.
- Nota ölçüleri da eğitim sürecinin bir parçası olarak sisteme dahil edilmiştir.

Geliştirilen projede ritim geçişlerinde insanlar tarafından önceden tanımlanmış hazır kalıplar kullanılmamış, nota ölçüleri de Markov süreci eğitimine dahil edilmiştir. Önerilen sistemin Markov zinciri ile müzik üreten diğer çalışmalardan başka bir farkı ise üretilen parçanın iki enstrümanlı olması ve ikinci enstrümanın, birinci enstrümanın nota geçişlerinden çıkarılan modeller kullanılarak üretilmesidir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Markov modeli, bilgisayar bilimlerinde yaygın olarak kullanılan bir stokastik süreçtir. Markov modelinin kapsadığı süreçler rastgele değişen durumların simülasyonunda kullanılmaktadır. Eğer Markov modelindeki durumlar dışarıdan izlenebiliyorsa ve ayrık ise, bu sürece *Markov zinciri* adı verilir. Markov zincirlerinin çalışma ilkesi önceki durum geçişleri baz alınarak bir durum geçişi matrisi çıkarılmasına dayanır.

Önerilen markov tabanlı otomatik müzik besteleme yaklaşımında notalar ve ölçüler için iki ayrı markov zinciri oluşturulmuştur. Notalar için tanımlanan Markov zinciri basit olarak (1) denklemlle ifade edilebilir.

$$N_{nota} = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de Q durumların kümesi olup (2) ifadesinde gösterilen notaları kapsamaktadır. Σ notalar arası geçiş olasılıklarını, δ durum geçiş fonksiyonunu, q_0 başlangıç durumunu ve F son durumu göstermektedir. q_0 ve F herhangi iki nota olarak seçilebilir.

$$Q = \{Sus, \dots, C3, C\#3, D3, D\#3, E3 \dots\} \quad (2)$$

Nota ölçüleri için oluşturulan markov zinciri ise Eşitlik (3) ile gösterilmiştir. Bu markov zincirinde R, Eşitlik (4) ile belirtilmiş nota ölçülerini kapsamaktadır. r_0 başlangıç durumu ve G son durumu herhangi iki ölçü olarak seçilebilir.

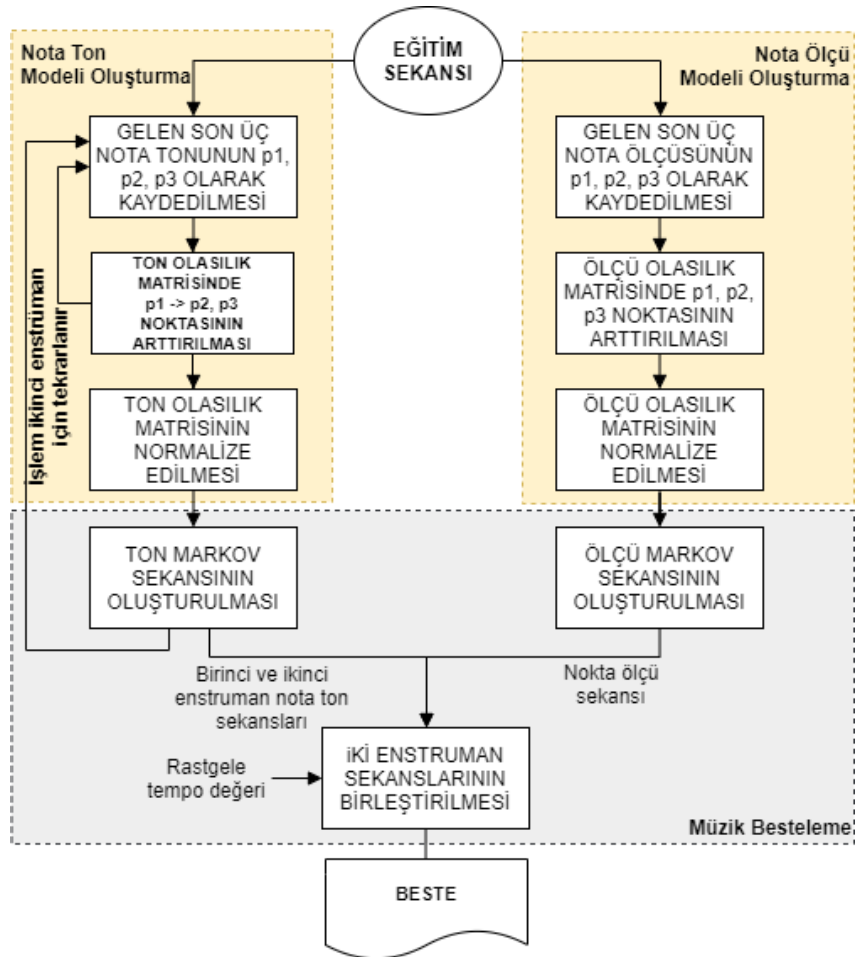
$$N_{ölçü} = (R, \Sigma, \delta, r_0, G) \quad (3)$$

$$R = \left\{ \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1 \right\} \quad (4)$$

Bir Markov zinciri, kendinden önceki n adet durumu hatırlayabilir. n adet durumu hatırlayabilen Markov zincirine n 'inci mertebeye Markov zinciri denir. İkinci mertebeye Markov zincirleri, birinci mertebeye Markov zincirlerine göre daha etkin sonuçlar vermektedir. Öte yandan, üçüncü mertebeye Markov zincirlerinin hesaplama karmaşıklığının yükselmesi ve performans olarak ikinci mertebeye Markov zincirleriyle aynı seviyede olması nedeniyle (Lo & Lucas, 2006) bu çalışmada üçüncü mertebeye Markov zincirleri değerlendirilmeye alınmamıştır.

Önerilen sistemde uygulanacak Markov zinciri ikinci mertebeden olup, 127 nota ve bir sus notası arasındaki geçişleri modeller. Modellenen matris sus notası ve A'nın -2. oktavından başlayıp, G'nin 8. oktavına kadar uzanmaktadır.

Markov model ile çift enstrümanlı müzik besteleme sistemi, girdi olarak kullanılan eğitim müzik parçası ile markov model oluşturma ve oluşturulan markov model ile müzik besteleme olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Sistem adımları Şekil 2'de ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 2. Markov Modeli ile Çift Enstrümanlı Müzik Besteleme (Composition of Music with Dual Instruments by Using Markov Model)

Önerilen sistemde eğitim parçasının nota tonları ve ölçüleri kullanılarak nota ton ve ölçü modelleri oluşturulmaktadır. Her iki modelin oluşturulmasında da olasılık matrisi hesaplama ve normalizasyon adımları yer almaktadır. Model oluşturma adımının detayları Bölüm 3.1'de verilmiştir. Oluşturulan modeller kullanılarak Bölüm 3.2'de anlatılan müzik besteleme aşamasında önce birinci enstrüman için sekans üretilir ardından bu sekansın modeli çıkartılarak ikinci enstrümana sekans üretmede kullanılır. İki sekansın ve rastgele belirlenen tempo değerlerinin birleştirilmesi ile çift enstrümanlı müzik besteleme işlemi tamamlanmış olur.

3.1 Markov Model Oluşturma (Markov Model Generation)

Markov model oluşturma aşamasında notalar arası geçiş olasılıklarını (Σ) hesaplamak için, (5) ifadesinde verilen Markov geçiş matrisi üretilmektedir.

$$M_{nota} = \begin{matrix} Sus \rightarrow Sus \\ A_{-2} \rightarrow A_{-2} \\ A_{-2} \rightarrow A\#_{-2} \\ \vdots \\ A_{-2} \rightarrow G_8 \\ \vdots \\ G_8 \rightarrow G_8 \end{matrix} \begin{pmatrix} Sus & A_{-2} & \cdots & G_8 \\ p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,127} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdots & p_{1,127} \\ p_{2,0} & p_{2,1} & \cdots & p_{2,127} \\ p_{3,0} & p_{3,1} & \cdots & p_{3,127} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{127,0} & p_{127,1} & \cdots & p_{127,127} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{16383,0} & p_{16383,1} & \cdots & p_{16383,127} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Eşitlik (5)'deki matrister her bir p_{ij} , satırda belirtilen durumdan sütunda belirtilen duruma geçiş olasılığını göstermektedir. Birinci mertebeden bir Markov zinciri sadece son durumu kapsamaktadır. Bu çalışmadaki Markov zinciri son iki durumu ele aldığından, matrisin boyutu $(128 \times 128) \times 128$ 'dir.

Geçiş matrisi hücreleri başlangıçta 0 ile iklenir. Girdi olarak kullanılan müzik parçasının notaları tek tek ele alınarak her iterasyonda şu anki duruma (p_n), şu anki durumdan bir öncesine (p_{n-1}) ve iki öncesine bakılır (p_{n-2}) ve geçiş matrisinde ($p_{n-2} \rightarrow p_{n-1}, p$) hücresi 1 arttırılır.

Önerilen modelde nota ölçüleri için ikinci bir ikinci dereceden Markov zinciri uygulanmaktadır. Modellenen matris altı farklı nota ölçüsüne bölünmüştür: Otuzikilik ölçü, onaltılık ölçü, sekizlik ölçü, dörtlük ölçü, yarım ölçü ve tam ölçü. Girdi müzik parçasının nota ölçüleri için oluşturulan Markov geçiş matrisi Eşitlik (6)'da gösterilmiştir. Bu matris de nota ton geçişleri için oluşturulan matris ile aynı yöntemle, ancak bu kez eğitim için kullanılan müzik parçasının nota ölçüleri taranarak oluşturulur.

$$M_{ölçü} = \begin{matrix} \frac{1}{32} \rightarrow \frac{1}{32} \\ \frac{1}{32} \rightarrow \frac{1}{16} \\ \frac{1}{32} \rightarrow \frac{1}{8} \\ \frac{1}{32} \rightarrow \frac{1}{4} \\ \frac{1}{32} \rightarrow \frac{1}{2} \\ \frac{1}{32} \rightarrow 1 \\ \vdots \\ 1 \rightarrow 1 \end{matrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{32} & \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 \\ p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & p_{0,3} & p_{0,4} & p_{0,5} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & p_{1,4} & p_{1,5} \\ p_{2,0} & p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & p_{2,4} & p_{2,5} \\ p_{3,0} & p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} & p_{3,4} & p_{3,5} \\ p_{4,0} & p_{4,1} & p_{4,2} & p_{4,3} & p_{4,4} & p_{4,5} \\ p_{5,0} & p_{5,1} & p_{5,2} & p_{5,3} & p_{5,4} & p_{5,5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{35,0} & p_{35,1} & p_{35,2} & p_{35,3} & p_{35,4} & p_{35,5} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Eğitim aşamasının son adımında, oluşturulan nota ve nota ölçü geçiş matrisleri (7) bağıntısı ile normalize edilmektedir. Normalizasyon, matrisin her satırındaki bütün olasılık durumlarının toplanması ve sonra her satır için olasılıkların bu toplama bölünmesi ile yapılmaktadır.

$$p_{ij}^{normalize} = \frac{p_{ij}}{\sum_j p_{ij}} \quad (7)$$

3.2 Çift Enstrümanlı Müzik Besteleme (Composition of Music with Dual Instruments)

Nota ve ölçüleri için normalize edilmiş geçiş matrisleri hesaplandıktan sonra bu modeller kullanılarak müzik besteleme aşamasına geçilmektedir.

Bu aşamada tonlar ve ölçüler için Markov zincirinin geçiş fonksiyonu δ kullanılarak ayrı birer sekans oluşturulmaktadır. Bunun için aralarındaki geçiş olasılığı yüzde sıfır olmamak şartıyla ilk iki nota rastgele olarak seçilir. Geçiş fonksiyonu, sıradaki her nota için M_{nota} matrisinde ($n-2 \rightarrow n-1, n$)'e denk gelen olasılıklardan en

yükseğini veren notayı seçerek yeni bir sekans üretir. Sekans, 60 adet ile 120 adet arasında durum geçişi ürettikten sonra durdurulur.

Bu durum geçişi aralığının kullanılmasının sebebi, üretilmiş bir bestenin uzunluğunun ortalama 15-30 saniye arasında olmasının sağlanmasıdır. Genelde 15-30 saniyelik melodiler kişilerde akılda kalıcılığı arttırmaktadır, çünkü tonaliteyi sağlamak uzun melodilerde daha güçtür (Long, 1977).

Aynı işlem $M_{ölçü}$ matrisi için de tekrarlanarak bestelenecek parçanın nota ölçü sekansı elde edilir. İlk enstrüman için bestelenen müzik parçası, üretilen nota ve nota ölçü sekanslarının birleştirilmesi ile oluşmaktadır.

Sonraki adımda ikinci enstrüman için yeni bir model oluşturmak ve bu yeni modelden ilk enstrüman ile uyumlu bir ikinci enstrüman sekansı üretmek amacıyla, birinci enstrüman için üretilen nota sekansı tekrar Markov model oluşturma sürecine girdi olarak verilir.

Elde edilen ikinci enstrüman nota sekansı $M_{ölçü}$ matrisi ile elde edilen nota ölçü sekansı ile birleştirilerek ikinci enstrüman müzik çıktısı oluşturulur. Bu şekilde ikinci enstrümanın, birinci enstrümana bağlı bir nota dizilimi üretmesi sağlanır. İkinci enstrümanın, birinci enstrümanın Markov modeli üzerinden yeniden eğitilerek kullanılmasındaki amaç, müzikal armoninin artırılmasıdır.

En son aşamada rastgele seçilen bir tempo değeri ve iki enstrüman için rastgele iki sanal enstrüman belirlenerek, oluşturulan nota ton ve ölçü sekansları birleştirilerek çift enstrümanlı beste oluşturulur.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Markov modeline girdi olarak verilen ve bestelenen müzik parçalarının nota sekansları MIDI (Musical Instrument Digital Interface) formatında tutulmaktadır. MIDI, elektronik ortamda müzik bilgisinin metinsel olarak kodlanmasında kullanılan bir iletişim protokolüdür. MIDI dosyaları ses sinyali içermemektedir, ses sinyalleri yerine notalarla ilgili mesajlar içermektedir. Bir sanal çıkış cihazı, MIDI sekanslarını okuyarak anlık olarak ses dosyaları üretebilmektedir. Birinci ve ikinci enstrüman için Markov model ile oluşturulan sekanslar MIDI sanal çıkış cihazına gönderilir. MIDI çıkış cihazına gönderilen değerler aynı n . nota için iki farklı enstrümanda aynı ölçüde çalınır.

Markov süreciyle müzik üretimi için kodlama C# ile gerçekleştirilmiş olup Leslie Sanford'a ait C# MIDI Toolkit kütüphanesinden yararlanılmıştır (Sanford, 2007). Besteleme süreci ile oluşturulan MIDI dosyaları Microsoft GS Wavetable Synth sanal çıkış cihazı ile çalınmaktadır.

Önerilen sistemin performansını değerlendirmek amacı ile Markov zincirlerinin çeşitli uygulamaları anketlerle test edilmiş, bir adet somut örnekle desteklenmiştir. Sistem performansı öznel niteliklerinden dolayı otomatik olarak ölçülemeyeceğinden, Turing testi ve iki farklı beğeni testi olmak üzere, üç farklı anket uygulanmıştır.

Testlerden ilki *Turing* testidir. Turing testinde amaç, bir insanın, makine tarafından üretilen çıktının bir insan besteciye mi, yoksa makineye mi ait olduğunun ayırımı yapıp yapamadığını ölçmektir. Turing testi için farklı yaş gruplarından 51 dinleyiciye 9'u Markov süreciyle, 4'ü insan eliyle üretilmiş 13 farklı parça dinletilmiştir. Daha sonra dinleyicilere bu parçaların insan yapımı olup olmadığı sorulmuştur. 9 parça içinde yanlış sınıflandıranlar ya da kararsız kalanların oyları performans analizinde başarılı olarak sayılmıştır. Tablo 1'de Turing testinin sonuçları yer almaktadır. Turing testinde ortalama %43'lük bir başarı elde edilmiştir.

Tablo 1. Turing Testinin Sonuçları (Results of Turing Test)

Parça	Yanlış/Kararsız Sınıflandırma Oranı
1	%35.294
2	%41.176
3	%23.529
4	%56.863
5	%80.392
6	%21.569
7	%35.294
8	%72.549
9	%21.569
Ortalama	%43.137

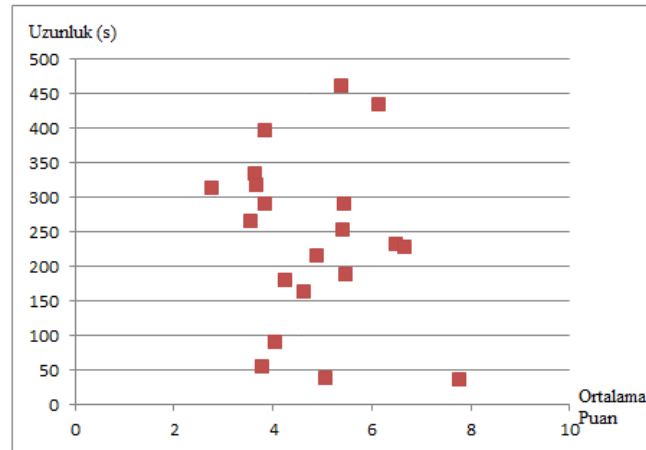
Testlerden ikincisi beğeni testi olup, aynı 51 dinleyiciye Markov süreciyle üretilmiş 20 parça dinletilmiştir. Dinleyicilerden en kötü 1, en iyi 10 olmak üzere Rock, Blues, Klasik ve Pop olmak üzere dört farklı müzik türünden eğitim parçaları kullanılarak otomatik olarak bestelenen parçaları puanlandırmaları istenmiştir. Tablo 2'de beğeni

testinin sonuçları, varyansları ve elde edilen müziğin eğitim verisinin uzunluğu yer almaktadır.

Tablo 2. Dört Farklı Müzik Türü İçin Yapılmış Beğeni Testinin Sonuçları (The Results of the Liking Test for Four Different Music Genres)

Parça	Tür	Beğeni	Varyans(σ)	Orijinal Müzik Uzunluğu
1	Rock	6.51	3.94	3:52
2	Rock	4.64	4.55	2:43
3	Rock	2.77	3.45	5:12
4	Rock	3.84	3.72	6:36
5	Rock	3.55	2.57	4:25
6	Blues	4.27	3.26	3:00
7	Blues	6.68	4.49	3:48
8	Blues	3.84	4.13	4:50
9	Blues	5.39	4.74	7:42
10	Blues	3.66	3.72	5:34
11	Klasik	3.78	2.68	0:55
12	Klasik	4.05	4.59	1:29
13	Klasik	6.14	5.39	7:14
14	Klasik	4.89	4.96	3:36
15	Klasik	7.77	4.08	0:35
16	Pop	5.08	4.19	0:38
17	Pop	5.48	4.93	3:07
18	Pop	5.45	2.84	4:50
19	Pop	5.43	4.43	4:13
20	Pop	3.68	6.26	5:17
Ortalama		4.84	4.15	

Beğeni testi 10 üzerinden 4.84 ortalamaya sahiptir. Orijinal müzik uzunluğu ile beğeni miktarı ve varyansı arasındaki korelasyonu araştırmak amacı ile beğeni testi için üretilen 20 parça'nın eğitim parçaları araştırılmıştır. İlgili verilerin grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Dikey eksen üretilen müziğin eğitim parçasının uzunluğunu belirtmektedir. Grafikten çok uzun süreli eğitim verilerinin beğeniye düşürdüğü çıkarımı yapılabilir. Özellikle beş dakikadan uzun eğitim verilerinde beğeni ortalamasının 5'in altına düştüğü görülmektedir.

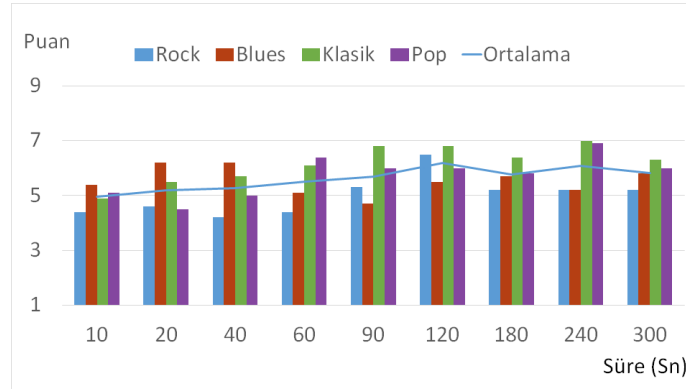


Şekil 3. Orijinal Müzik Uzunluğu İle Beğeni Puanı Arasındaki Korelasyon (Correlation Between Original Music Length and Liking Score)

Üçüncü test, eğitim için kullanılacak müzik kesitinin uzunluğunun üretilen müzik sekansına etkisini incelemek için yapılmıştır. Bu amaçla dört farklı müzikten dokuzar beste üretilmiştir. Bu bestelerin eğitim süreleri sırasıyla 10, 20, 40, 60, 90, 120, 180, 240 ve 300 saniyedir. Bu besteler 10 farklı kişiye dinletilerek 1 ile 10 arasında puanlandırılması sağlanmıştır. Sonuç grafiği Şekil 4'te verilmiştir.

En çok beğenilen Rock müzik çıktısı 120 saniyelik eğitim verisinin çıktısıdır. En çok beğenilen klasik müzik çıktısı 240 saniyelik eğitim verisinin çıktısıdır. Blues için en çok beğenilen çıktı 40 saniye için olmuştur. Son olarak, Pop müzik için en çok beğenilen çıktı 240 saniyelik eğitim verisinin çıktısıdır. Bu grafikten yola çıkılarak, beş dakikalık müziklerin beğeniye düşürdüğü söylenebilir. Aynı zamanda, çok kısa eğitim sürelerinde beğeni oranının düşük olduğu gözlemlenebilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi ortalama beğeni eğrisi bir noktaya kadar artış

gösterirken, 120. saniyeden sonra alternatif bir şekilde düşüp yükselmektedir. İkinci beğeni testinde 120 saniyelik müzik parçalarından üretilen sekansların beğeni ortalaması 6.2 iken genel ortalama 5.62'dir.



Şekil 4. Eğitilde Kullanılan Müzik Kesiti Uzunluğuna Bağlı Beğeni Skorları (Liking Scores Based on the Length of the Music Section Used in Training)

Elde edilen 6.2'lik beğeni puan, ilk beğeni testi ortalaması olan 4.84'ten daha iyi bir başarıdır. Eğitim için kullanılacak müzik parçası kesitlerinin uzunluklarının 120 sn olarak belirlenmesi, detayları Tablo 2'de verilmiş beğeni testi ortalama puanının da artmasını sağlayacaktır.

Ne yazık ki geliştirilen sistemin başarısının literatürdeki diğer çalışmaların başarıları ile adil olarak karşılaştırılması, eğitim için kullanılan müzik parçalarının ve ankete katılan kişilerin farklılıkları sebebi ile mümkün olamamıştır. Elde edilen beğeni ve Turing testi sonuçlarına baktığımızda, önerilen Markov model ile çift enstrümanlı müzik besteleme sisteminin yine Markov zinciri kullanan Van der Merwe'nin yüzde 38 başarısına göre (Van der Merwe, 2011) daha yüksek başarı elde ettiği gözlenmiştir. Bu gözlem bizi çift enstrüman kullanmanın sadece Markov tabanlı sistemlerin değil farklı metodolojiler izleyen sistemlerin de başarısını arttırabileceği sonucuna götürmektedir. Öte yandan, elde edilen başarı oranları daha yüksek karmaşıklığa sahip ve tek enstrüman kullanan Roig'in çalışmasındaki %64 başarıyla kıyaslanabilir düzeydedir (Roig, 2018).

Eğitim için kullanılan parçalar ile önerilen sistemin otomatik olarak ürettiği parçaların birbirlerine ne derecede benzediğini görsel olarak ortaya koyabilmek için Şekil 5'de Mozart'ın *Marcia Alla Turca* parçası ve bu parçadan üretilmiş müzik parçasının kesitleri verilmiştir. Şekil 5(a)'da *Marcia Alla Turca* parçasının bir kesiti yer almaktadır. Parçada gözlemlenen nota ton örüntüleri incelendiğinde notalarda kullanılan ölçülerin çeyrek, sekizlik ve on altılık olduğu, sus notalarının ise on altılık ve çeyrek ölçüde olduğu görülebilir. Şekil 5(b)'de ise Markov süreciyle bestelenen parçanın bir kesiti yer almaktadır. Üretilen parça incelendiğinde yine notalarda kullanılan ölçülerin çeyrek, sekizlik ve on altılık olduğu gözlemlenebilir. Üretilen parça ve *Marcia Alla Turca*'nın notalarının kullanım sayıları Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3. Marcia Alla Turca'da ve Markov Süreci ile Üretilen Müzikte Notaların Görülme Sıklıkları (Frequency of Notes in Marcia Alla Turca and Music Produced by Markov Process)

Nota	Marcia Alla Turca'da notaların görülme sıklığı	Markov süreci ile üretilen müzikte notaların görülme sıklığı
C	23	21
D	2	2
D#	1	0
E	12	12
F	6	1
F#	1	0
G	7	4
G#	3	7
A	21	25
B	9	10

Orijinal müzik ve bu müzikten çıkarılan model ile bestelenen parçada notaların görülme sıklıkları karşılaştırıldığında, üretilen parçada orijinal parçada görülen D# ve F# notalarının artık yer almadığı görülebilir. Aynı zamanda notaların kullanım sıklıklarının benzer sayılarda olduğu, A ve C notalarının orijinal parçadaki gibi en çok kullanılan notalar olduğu gözlemlenebilir.

Eğitim parçası ve üretilen parçanın notalarında benzer örüntülere rastlamak mümkündür. Şekil 5'te *Marcia Alla Turca* ile sistem tarafından üretilen parça arasında eşleşen örüntüler, her iki parçada aynı renkli kutularla gösterilmiştir. Sonuç olarak, Markov süreci ile elde edilen bestelerde nota örüntülerinde ve nota tonlarında

benzerlik görülmesine karşın, nota ölçülerinin değişim göstermesi ve orijinal parçada görülen nota örüntülerinin kendi içinde yer değiştirmeleri sayesinde, orijinal parçadan farklı bir sekans ortaya çıkması sağlanmaktadır.

(a)

(b)

Şekil 5. Nota Örüntüsünde Eşleşmeler. (a) Marcia Alla Turca (b) Markov Süreci ile Üretilen Müzik Parçası (Matches in the Note Pattern (a) Marcia Alla Turca (b) Music Piece Composed by Markov Process)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, Markov zincirlerinin kullanımı ile çeşitli besteler elde edilmiştir. Markov zincirlerinin elde edilmesinde iki farklı ana parametre kullanılmıştır: Nota ölçüleri ve nota tonları. Elde edilen bütün besteler, aynı anda iki enstrüman kullanılmaktadır ve bestelerde iki enstrümanın nota ölçüleri aynı zaman içinde eşittir. Üretilen parçalarda bir enstrüman aynı anda bir nota sesi çıkartabilmektedir. Önerilen modelin düşük hesaplama karmaşıklığına sahip olması, sistemin son yıllarda popülerliği oldukça artan mobil cihazlara uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır.

Anketin sonuçlarından yola çıkılarak insan yapımı müziklerin, bilgisayar yapımı müziklere tercih edildiği gözlenmekle birlikte Turing testinden elde edilen sonuçlar oldukça umut vericidir. Projede yeni üretilen müzikler, kendilerine ait insan yapımı girdilerle notaların örüntüleri ve kullanım sayıları açısından benzerlik göstermektedir, yine de bilgisayarla üretilmiş beste kendi içinde bir özgünlük sağlamaktadır.

Farklı enstrümanların birbirine bağlı olarak eğitilerek kullanılıyor oluşunun tek enstrüman veya birbirinden bağımsız enstrümanlara göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Birbirinden etkilenen iki enstrüman için sekans üretilmesi optimizasyona dayalı müzik besteleme sistemlerinin de başarısını arttıracaktır. Eğitim parçasının orijinal uzunluğunun ve eğitim için kullanılacak kesitinin süresinin, üretilen müziğin performansına

etkisi ortaya konmuştur. Elde edilen analiz sonuçları literatürdeki diğer otomatik müzik besteleme yöntemlerinin iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca çalışmamız, insan makine etkileşimini daha efektif hale getirmektedir.

İleride bu çalışmaya ek olarak bestelerin üretiminde zaman işaretleri dahil edilebilir ve üretilen iki enstrümanın aynı zamanda farklı nota ölçüleri basması sağlanabilir. Notaların geçişleri arasındaki örüntüler üstünde kural-tabanlı sistemler ve optimizasyon yöntemleri uygulanabilir. Otomatik müzik bestelemenin geleceğinin açık olmasıyla birlikte, daha farklı yöntemlerin keşfedilmesiyle daha başarılı sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ames, C. (1987). Automated composition in retrospect: 1956-1986. *Leonardo*, 20 (2), 169-185.
- Ariza, C. (2011). Two pioneering projects from the early history of computer-aided algorithmic composition. *Computer Music Journal*, 35 (3), 40-56.
- Boenn, G., Brain, M., De Vos, M., & Ffitch, J. (2011). Automatic music composition using answer set programming. *Theory and practice of logic programming*, 11 (2-3), 397-427.
- Burton, A. R., & Vladimirova, T. (1999). Generation of musical sequences with genetic techniques. *Computer Music Journal*, 23 (4), 59-73.
- Chen, C.-C., & Miikkulainen, R. (2001). Creating me-lodies with evolving recurrent neural networks. In *Neural networks, 2001. proceedings. ijcn'n'01. international joint conference on (Vol. 3, pp. 2241-2246)*
- Colombo, F., Muscinelli, S. P., Seeholzer, A., Brea, J., & Gerstner, W. (2016, June). Algorithmic Composition of Melodies with Deep Recurrent Neural Networks. ArXiv e-prints.
- de la Puente, A. O., Alfonso, R. S., & Moreno, M. A. (2002). Automatic composition of music by means of grammatical evolution. In *Acm sigapl apl quote quad (Vol. 32, pp. 148-155)*.
- Frequencies of musical notes, a4 = 440 hz.(n.d.). Retrieved from <https://pages.mtu.edu/suits/notefreqs.html>
- Garcia Salas, H. A., Gelbukh, A., Calvo, H., & Galindo Soria, F. (2011, 12). Automatic Music Composition with Simple Probabilistic Generative Grammars. *Polibits*, 59 - 65.
- HEDGES, S. A. (1978). Dice music in the eighteenth century. *Music and Letters*, 59 (2), 180-187. doi: 10.1093/ml/59.2.180
- Herremans, D., Weisser, S., Sörensen, K., & Conklin, D. (2015). Generating structured music for bagana using quality metrics based on markov models. *Expert Systems with Applications*, 42 (21), 7424 - 7435. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.043>
- Hiller, L. A., & Baker, R. A. (1964). Computer cantata: A study in compositional method. *Perspectives of New Music*, 3 (1), 62-90.
- Holtzman, S. R. (1981). Using generative grammars for music composition. *Computer Music Journal*, 5 (1), 51-64
- Hornel, D., & Menzel, W. (1998). Learning musical structure and style with neural networks. *Computer Music Journal*, 22 (4), 44-62.
- Lo, M., & Lucas, S. M.(2006). Evolving musical sequences with n-gram based trainable fitness functions. In 2006 iee international conference on evolutionary computation (p. 601-608). doi: 10.1109/CEC.2006.1688365
- Long, P. (1977). Relationships between Pitch Memory in Short Melodies and Selected Factors. *Journal of Research in Music Education*, 25(4), 272-282. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/3345268>
- Mazurowski, L. (2012, Sept). Computer models for algorithmic music composition. In 2012 federated conference on computer science and information systems (fedcsis) (p. 733-737).
- Merwe, A. V. D., & Schulze, W. (2011, March). Music generation with markov models. *IEEE MultiMedia*, 18 (3), 78-85. doi: 10.1109/MMUL.2010.44
- Muñoz, E., Cadenas, J. M., Ong, Y. S., & Acampora, G. (2016, Feb). Memetic music composition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20 (1), 1-15. doi: 10.1109/TEVC.2014.2366871
- Papadopoulos, A., Roy, P., & Pachet, F. (2014). Avoiding plagiarism in markov sequence generation. In *Proceedings of the twenty-eighth aai conference on artificial intelligence (pp. 2731-2737)*. AAAI Press.
- Roig, C., Tardón, L. J., Barbancho, I., & Barbancho, A. M. (2014). Automatic melody composition based on a probabilistic model of music style and harmonic rules. *Knowledge-Based Systems*, 71, 419 - 434
- Roig, C., Tardón, L. J., Barbancho, I., & Barbancho, A. M. (2018). A non-homogeneous beat-based harmony markov model. *Knowledge-Based Systems*, 142, 85 - 94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.11.027>
- Sanford, L., (2007). C# MIDI Toolkit <https://www.codeproject.com/Articles/6228/C-MIDI-Toolkit>
- Tanaka, T., Nishimoto, T., Ono, N., & Sagayama, S. (2010). Automatic music composition based on counterpoint and imitation using stochastic models.
- Toivanen, J. M., Toivonen, H., & Valitutti, R. (n.d.). Automatical composition of lyrical songs.
- Westergaard, P., & Hiller, L. A. (1959). *Journal of Music Theory*, 3 (2), 302-306.
- Zhao, Y., Liu, L., Huang, Y., & Fang, N. (2019). Automatic Composition of Music by LSTM. In 2018 International Workshop on Education Reform and Social Sciences. Atlantis Press.

Ek:**Temel Müzik Teorisi (Supplementary Material: Basic Music Theory)**

Nota, belli bir zaman uzunluğuna ve belli bir frekansa sahip bir ses parçasıdır. Müzik, basitçe notaların yan yana getirilmelerinden meydana gelir. Bu notalar arasında belli boşluklar bulunabilir. Bu boşluklara sus adı verilir.

Batı müziğindeki notalar, oktav denen gruplar içinde toplanmıştır. Her oktavın içinde ise temelde 7 ana, 5 ara olmak üzere toplam 12 nota bulunmaktadır. Tablo 4'te notalar ve dördüncü oktavdaki frekans karşılıkları verilmiştir (*Frequencies of Musical Notes, A4 = 440 Hz, n. d.*).

Tablo 4. Notalar ve Frekans Karşılıkları (Notes and Corresponding Frequencies)

Nota	Okunuş	Frekans (Hz)
C	Do	262
C#	Do Diyez	277
D	Re	294
D#	Re Diyez	311
E	Mi	330
F	Fa	349
F#	Fa Diyez	370
G	Sol	392
G#	Sol Diyez	415
A	La	440
A#	La Diyez	466
B	Si	494

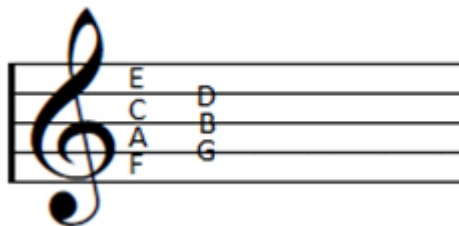
"#" işareti, diyez diye okunur ve belirtilen nota ile kendinden sonraki notanın arasında bulunduğunu ifade eder. E ve B notalarının diyez işareti yoktur. Aynı zamanda "b" işareti de bulunur, bemol diye okunur ve belirtilen nota ile kendinden önceki notanın arasında bulunduğunu ifade eder. F ile C notalarının bemol işareti yoktur. Her oktavın notaları, kendinden önceki oktavın iki katı, kendinden sonraki oktavın yarısı frekansa sahiptir.

Tek bir parçada 12 nota aynı anda bulunamayabilir. Bazı notalar birbirleri arasında uyum içindedir. Bu uyumlu notaların toplandığı gruplara gam denir. Her gam kendine bir notayı anahtar adı verilen ana ton olarak seçer ve diğer notalar ile olan göreceli ilişkisine göre gruplanır. Örneğin, C Majör gamı her oktavdaki C, D, E, F, G, A, B notalarını kapsarken; D Majör gamı her oktavdaki D, E, F#, G, A, B, C# notalarını kapsar.

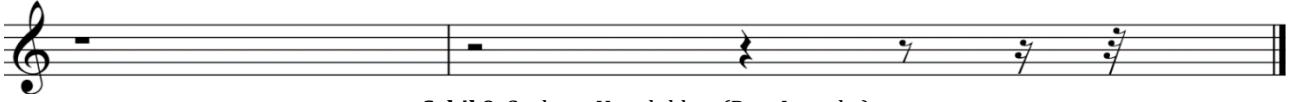
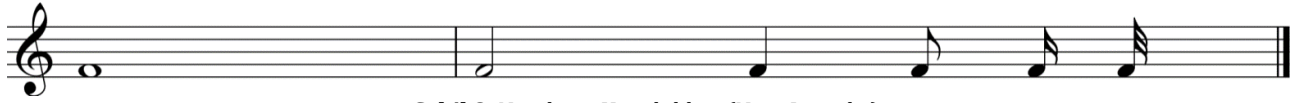
Notaların uzunlukları birbirlerinin katı şeklindedir. Bu uzunluklar tempo ile ilişkilidir ve tempo BPM (beats per minute) birimiyle ölçülür. Bu ölçüte göre 1 BPM'de tam bir nota ölçüsü bir dakika, 2 BPM'de tam bir nota ölçüsü otuz saniye, 60 BPM'de tam bir nota ölçüsü bir saniye sürmektedir. Standart bir şarkı temposu 120 BPM'dir. Notalarda **ölçüler**; tam, yarım, dördlük, sekizlik, on altılık, otuz ikilik şeklinde 2'nin negatif kuvvetlerine orantılı olarak azalmaktadır. Örneğin, 120 BPM'de tam ölçü 500 milisaniye, yarım ölçü 250 milisaniye, dördlük ölçü 125 milisaniyedir.

Notalar bir şarkı içinde ölçü çizgileri içinde gruplandırılır. Ölçü çizgileri içindeki nota uzunlukları tamamen sabittir ve bu ölçü çizgilerindeki zaman uzunlukları zaman işaretiyle belirlenir. Zaman işareti kesirli bir oran şeklinde belirtilir. Payda, notanın ölçüsünü belirler. Pay, paydadaki ölçüdeki notalardan kaç tane bulunduğunu belirler. Örneğin $\frac{4}{4}$ dendiğinde 4 adet dördlük ölçüde nota bulunduğu, $\frac{3}{8}$ dendiğinde 3 adet sekizlik ölçüde nota bulunduğu anlaşılır. Ölçü çizgisinin içinde 4 adet dördlük nota bulunmak zorunda değildir. Zaman işareti, bulunan notaların toplamda bu zaman uzunluğunda olması gerektiğini belirtir.

Notaların basılması sonucu verdiği düz sese vuruş adı verilir. Eğer nota basıldıktan sonra yukarıya doğru bir tonda gidiyorsa yukarı vuruş, eğer nota basıldıktan sonra aşağıya doğru bir tonda gidiyorsa aşağı vuruş ismini alır.

**Şekil 6.** Notaların yerleri (Location of Notes)

Aynı anda ve aynı uzunlukta basılan, aynı enstrümandaki en az iki noktaya akor adı verilir. Akorlar, tuşlu enstrümanlara göre en soldaki notayı referans alan isimlere sahiptir. Örneğin C akoru, C, E ve G notalarının aynı anda basıldığını ifade eder.



Nota kâğıtları okunurken dikkat edilmesi gereken üç kavram vardır: Nota anahtarı, nota tonu ve nota ölçüsü. Nota anahtarının şekli, notaların nasıl sıralanması gerektiğini göstermektedir. Şekil 6'da G (*sol*) anahtarı için her tonun bulunması gereken yer belirtilmiştir. Şekil 7'de örnek olarak G anahtarına göre C3 notasından itibaren C4 notasına kadar ara tonlar haricindeki tonlar verilmiştir. Bir ara ton belirtilmesi gerekiyorsa, ara ton bemol için "b", diyez için "#", sonraki notanın diyez ya da bemol olmadığını belirtmek için "4" kullanılır. Buna natürel nota da denir.

Notaların ölçülerini belirten notasyonlar Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 9'de ise sus notaları için gerekli notasyonlar belirtilmiştir. Bu notasyonlar sırasıyla tam, yarım, çeyrek, sekizlik, on altılık ve otuz ikilik ölçüleri göstermektedir.

Önerilen sistem tarafından bestelenmiş müzik parçalarından örneklere ve bu parçaların üretilmesi için kullanılan eğitim sekanslarına <https://github.com/hiremt/COMPOSITION-OF-MUSIC-WITH-DUAL-INSTRUMENTS-BASED-ON-MARKOV-MODEL> adresinden erişilebilir.



EŞ EKSENLİ ELEKTRO LİF ÇEKİM YÖNTEMİ İLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLİ KOMPOZİT NANOLİF ÜRETİMİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Gizem ÖZMEN, Sennur ALAY AKSOY*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Yağ Asidi, Polimetil Metakrilat, Kompozit Nanolif, Eş Eksenli Düze, Elektro Lif Çekimi.	Bu çalışmada, katı-sıvı faz değişim maddesi (FDM) olan yağ asitleri eş eksen düzeli (iç içe geçmiş iki düze) elektro lif çekim sistemi kullanılarak polimer kılıf tarafından kapsüllenmiştir. Böylece FDM'nin nanolif yapı içerisine öz madde olarak hapsedilmesi ve öz/kılıf yapısında ısı depolama/yayma özellikli kompozit nanoliflerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada nanolif üretimi için polimetil metakrilat (PMMA) polimeri, FDM olarak kaprik asit (KA), laurik asit (LA) ve miristik asit (MA) yağ asitleri kullanılmıştır. Üretilen nanoliflerin 19 ile 144 j/g aralığında değişen oranlarda ısı depolama özellikleri ve minimum 195 °C ve üzeri termal bozunma sıcaklıkları sundukları belirlenmiştir. Yağ asidi çözeltisinden ibaret öz madde içerisine iletken grafen ilavesinin homojen çaplı, düzgün yüzeyli ve silindirik şekle sahip nanolif üretimine olanak sunduğu belirlenmiştir. En yüksek enerji depolama kapasitesi laurik asit için elde edilmiş ve özellikle laurik asit/PMMA ve kaprik asit/PMMA içerikli kompozit nanoliflerin yüksek ısı depolama kapasitesine sahip termal enerji depolama malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

AN INVESTIGATION ON THE PRODUCTION OF COMPOSITE NANOFIBERS HAVING THERMAL ENERGY STORAGE PROPERTY BY CO-AXIAL ELECTROSPINNING METHOD

Keywords	Abstract
Fatty Alcohol, Polymethyl Methacrylate, Composite Nanofiber, Co-Axial Nozzle, Electrospinning.	In this study, fatty acids, which were solid-liquid phase-change material (FDM), were encapsulated by the polymer sheath using a coaxial (two intertwined nozzles) electrospinning system. Thus, FDM was confined in the nanofiber structure as a core material and the composite nanofibers with heat storage/releasing properties in core/sheath structure were produced. In the study, polymethylmethacrylate (PMMA) polymer was used for nanofiber production, capric acid (CA), lauric acid (LA) and myristic acid (MA) fatty acids as FDM were used. The produced nanofibers offered heat storage properties ranging from 19 to 144 j/g, and their thermal decomposition temperature was determined as a minimum of 195 °C. It was concluded that the addition of conductive graphene into the core material consisting of fatty acid solution enabled the production of nanofiber with a homogeneous diameter, smooth surface and cylindrical shape. The highest energy storage capacity was obtained for lauric acid and it was concluded that composite nanofibers containing lauric acid/PMMA and capric acid/PMMA can be used as thermal energy storage material with high heat storage capacity.

Alıntı / Cite

Özmen, G., Alay Aksoy, S., (2020). Eş Eksenli Elektro Lif Çekim Yöntemi ile Termal Enerji Depolama Özellikli Kompozit Nanolif Üretimi Üzerine Bir Araştırma, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1248-1259.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Özmen, 0000-0002-1680-0737
S. Alay Aksoy, 0000-0002-5878-6726

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.11.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	03.12.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: sennuralay@sdu.edu.tr, +90-246-211-1187

1. Giriş (Introduction)

Artan enerji tüketimine karşın azalan enerji kaynakları, enerjinin verimli kullanımını ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesi konusunu günümüzün öncelikle araştırılması gereken konuları haline getirmiştir. Ayrıca, daha yenilikçi, koruma ve konfor sunan ürünlere yönelik yeni yaşam tarzı trendleri, gelişmiş ısı yönetim çözümleri sunan alternatif malzemeler yaratmada ana itici güç haline gelmiştir (Noyan vd., 2018). Bir tür termal enerji depolama malzemesi olan faz değişim malzemeleri bu kapsamda pek çok disiplinde araştırılmaktadır. Gizli ısı depolama malzemeleri olarak da bilinen faz değişim malzemeleri faz değişim prosesleri boyunca gizli ısı enerjisi absorblayıp salabilen malzemelerdir. Faz değişim malzemeleri pek çok sektörde, ısıtma, serinletme, ısı düzenleme gibi amaçlar için enerji depolama malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Tekstil sektöründe, başlangıçta giysilerde termal konforu geliştirme amaçlı kullanılıyorken günümüzde ısıtma, serinletme ve özellikle ısı regülasyon amaçlı ev tekstili, koruyucu giysi, medikal ürünler vb. alanlarda FDMler yaygın olarak kullanılmaktadırlar. FDMler, belirli bir sıcaklıkta eriyen ve katılaştıran ve bu sırada yüksek kapasitede gizli ısı enerjisi depolayan ve yayan maddelerdir (Giro-Paloma, 2016; Genç, 2016). Ortam sıcaklığı erime sıcaklığına ulaştığında, FDM erimeye başlar ve erimesi tamamlanıncaya kadar ortamdan gizli ısı absorbe eder. Sıcaklık katılma sıcaklığına kadar düştüğünde ise FDM katılma süreci tamamlanıncaya kadar depoladığı ısı enerjisini geri verir (Mondal, 2008). Bu maddeler, yüksek ısı depolama kapasiteleri yanında farklı son kullanım alanlarının gereksinimlerine uygun faz geçiş sıcaklıklarına sahip olmaları, ısı alışı- verişini yaparken sıcaklıklarının hemen hemen sabit kalması ve düşük hacim değişikliğine maruz kalmaları nedeniyle termal enerji depolama malzemeleri olarak tercih edilmektedirler (Ceylan vd., 2017; Cai vd., 2012; Günerhan, 2004).

FDMler arasında önemli bir yere sahip, organik esaslı katı-sıvı faz değişim malzemeleri pek çok alanda en çok tercih edilen FDM türleridir. Bu maddeler katıdan sıvıya ve tam tersi faz değiştirme prosesleri sırasında gizli ısı enerjisi absorbe edip yayabilmektedirler. Bu yapıları itibari ile akışkan sıvı faza geçtiklerinde katı formda tutulabilmeleri için bir yapı içerisine paketlenmeleri gerekmektedir. Bu paketleme teknikleri arasında şekilsel olarak stabilize edilmiş FDM ürünleri önemli yer tutmaktadırlar. Şekilsel olarak stabilize edilmiş FDM üretiminde FDM materyal uygun bir polimer matriks yapı içerisine hapsedilmekte ve bu yapı içerisinde, dışarıya sızmadan katı-sıvı faz geçişinin tamamlanması sağlanmaktadır. Bu tür malzemelerin üretiminde hazırlanan polimer çözeltisi içerisine FDM karıştırılıp, polimerin çözücüsünün buharlaştırılması ile FDM'nin polimer matriks içerisinde hapsedilmesi sağlanmaktadır (Sarı vd., 2018; Zhang vd., 2018; Wu ve Wang, 2015; Qian vd., 2015; Alkan vd., 2012; Şentürk vd., 2011). Özellikle son yıllarda yapılan araştırmalarda şekilsel olarak stabilize edilmiş FDM üretimi için elektro lif çekim yöntemi kullanılmaktadır. Elektro lif çekim tekniği basit ve çok yönlü bir metot olup, elektrostatik kuvvet ile bir polimer çözeltisinin nanometre ile mikronun altında değişen çapta liflere dönüştürülmesini sağlamaktadır (Cai, vd., 2012; Hu ve Yu, 2014; Zdraveva vd., 2015). Teknik, ultra ince, yüksek yüzey alanına sahip, gelişmiş termal özellikte, hafif ve çeşitli kompozit materyallerle birlikte doğrudan kullanım için uygun yapıda FDM esaslı ürün geliştirme avantajları nedeniyle dikkat çeken bir tekniktir (Cai vd., 2012; Sun vd., 2015; Noyan vd., 2018). FDM-kompozit nanolifler ya tek düze ya da çift düze (eş eksenli, co-axial) elektro lif çekim yöntemleri ile üretilmektedir (Sun vd., 2015).

Günümüzde ısı depolama ve ısı düzenleme özellikli nanolif üretimi için araştırmalar eş eksenli elektro lif çekim yöntemi üzerine odaklanmıştır. Tek düzeli elektro lif çekim yönteminden farklı olarak, eş eksenli elektro lif çekim yöntemi, öz-kılıf yapıları nanolif üretimi için çekirdek (öz) maddenin nanolif oluşturan polimer kılıf içerisine enkapsülasyonunu sağlayan bir teknik olup, geliştirilen lif yapısı itibari ile tek düzeli elektro lif çekim yönteminden farklı ve avantajlı bir tekniktir (Hu ve Yu 2014; Lu vd., 2018). Geliştirilen öz-kılıf yapıları lifin kesitinde öz madde olarak hapsedilen FDM'nin çevresel koşullardan korunması ve kılıf yapıdan dışarıya sızması önlediği için daha stabil şekilsel olarak stabilize edilmiş kompozit yapı üretimine olanak sunmaktadır (Lu vd., 2019). Yöntem hem hidrofilik hem de olefilik FDMlerin enkapsülasyonuna olanak sunar ve FDM kompozit liflerin mekanik özelliklerini geliştirir (Noyan vd., 2018).

Bu çalışmada, eş eksenli elektro lif çekim yöntemi kullanılarak termal enerji depolama özellikli kompozit nanoliflerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, yağ asitleri öz madde, PMMA polimeri kılıf polimeri olarak kullanılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bu çalışmada gizli ısı enerjisi depolama/yayma ve ısı düzenleme özellikli FDM nanolif üretimi için eş eksenli elektro lif çekim yönteminin kullanımına odaklanılmıştır. Bu amaca yönelik olarak çalışmada konu ile ilgili yapılan araştırmalar incelenmiştir. Literatürde farklı tür FDMlerin eş eksenli elektro lif çekim sistemi ile kapsülasyonu ve nanolif üretimi konusunda araştırmalar mevcuttur. McCann ve arkadaşları (2006) TiO₂-poli(vinil prolidon) (PVP) kılıf içerisinde uzun zincirli hidrokarbon içeren nanolifleri eriyikten eş eksenli elektro lif çekim yöntemi ile üretmiştir. Chen ve arkadaşları (2013) eş eksenli elektro lif çekim yöntem ile termal enerji depolama amaçlı

polietilen glikol/selüloz asetat öz-kılıf yapılı nanolif üretmişlerdir. Van Do, Nguyen ve Park (2013) eykosan/poli(vinilindin florür) öz/kılıf yapılı nanolifleri eriyikten eş eksenli elektro lif çekim yöntemi ile üretmişlerdir. Hu ve Yu (2014) eş eksenli elektro lif çekim yöntemi ile doğal vaks içeren poliüretan nanolif esaslı kompozit biyo-FDM üretmişlerdir. Dang ve arkadaşları (2015) tek düzeli ve eş eksenli elektro lif çekim yöntem ile polietilen glikol yüklü poli(vinilindin florür) nanolifler üretmişlerdir. Sun ve arkadaşları (2015) aynı metot ile parafinik oktadekan/polivinil bütiral nanolifler üretmişlerdir. Sarier ve arkadaşları (2016) polietilen glikol polimerini aşılacakları poliakrilonitril polimerini öz, saf poliakrilonitril polimerini kılıf polimeri olarak kullanarak ısı düzenleme özellikli nano yüzeyleri eş eksenli elektro lif çekim yöntemini kullanarak üretmişlerdir. Babapoor ve arkadaşları (2017) polietilen glikol polimerini öz, poliamid 6 polimerini kılıf polimeri olarak kullanıp öz/kılıf yapılı nanolif üretimi gerçekleştirmişlerdir. Wan ve diğerleri (2016), poliakrilonitril polimerinin kılıf, parafin yağlarının öz madde olduğu FDM nanolif üretimi gerçekleştirmişlerdir. Noyan ve arkadaşları (2018) polietilen glikol metil eter ve polietilen glikol polimerlerini FDM, poliakrilonitril polimerini lif oluşturu polimer olarak kullanarak eş eksenli elektro lif çekim sistemi ile öz/kılıf yapıda nanolifli yüzeyler üretmişlerdir. Lu ve arkadaşları (2018) ise polimetil metakrilat kılıf içerisine parafin vaksı aynı yöntem ile kapsülleyecek öz/kılıf yapıda nanolif üretmişlerdir. Başka bir çalışmada Lu ve arkadaşları (2019) parafin vaksı poliakrilonitril kılıf içerisine eş eksenli elektro lif çekim sistemi ile kapsüllemişlerdir.

Literatür araştırmasından da görüldüğü üzere, eş eksenli elektro lif çekim yöntemini kullanarak, hidrofilik ve hidrofobik farklı tür FDMleri, farklı polimerler içerisine enkapsüle edecek şekilde nanolif üretimi ile ilgili araştırmalar özellikle 2010'lu yıllardan itibaren yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda da görüldüğü üzere FDM olarak genellikle polietilen glikol ve parafinler kullanılmıştır. Ancak bu çalışmaya konu olan yağ asitlerinin öz madde olarak kullanıldığı, eş eksenli elektro lif çekim yöntemi ile üretilmiş FDM nanolifler ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır. Örneğin, Hemmatian ve arkadaşları (2020) yağ asidi ötektik karışımlarını öz madde olarak içeren Naylon 6 polimer kılıflı nanolif ürettikleri çalışmalarında laurik asit/palmitik asit ikili ötektik karışımlarını kullanmışlardır. Literatürde, yağ asidi içerikli nanolif üretimi ile ilgili olarak hazırlanan polimer çözeltisi içerisine yağ asitlerinin karıştırılması ve karışımdan şekilsel olarak stabilize edilmiş FDM nanolif üretimi üzerine araştırmalar da mevcuttur (Chen vd, 2008; Cai vd, 2012). Bu çalışmada, özellikle koruyucu giysi yapılarına, sıcaklık duyarlı madde taşıma ekipmanlarına veya medikal ürünlere dahil edilebilecek nitelikte gizli ısı depolama/yayma özellikli kompozit nanolifli yüzey üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla üç farklı yağ asidinin, eş eksenli elektro lif çekim sistemi ile polimetil metakrilat polimer kılıf içerisine enkapsülasyonu ile ısı depolama ve ısı düzenleme özellikli kompozit nanolif yüzeylerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen nanoliflerin ısı depolama/yayma özellikleri yanında kimyasal yapıları ve morfolojileri araştırılmıştır. Yapılan bu araştırma üretilen FDM nanoliflerin öz/kılıf madde içerikleri itibari ile literatürden farklıdır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Öz/kılıf yapılı gizli ısı depolama özellikli nanoliflerin üretiminde kılıf yapıyı oluşturmak için polimetil metakrilat (Aldrich, molekül ağırlığı 350.000) polimeri kullanılmıştır. Nanoliflerin öz maddesini oluşturan gizli ısı depolama özellikli maddeler olarak ise saflıkları %98 ve üzeri olan kaprik asit (KA; C₉H₁₉COOH, dekanolik asit, Alfa Aesar), laurik asit (LA; C₁₁H₂₃COOH dodekanoik asit, Alfa Aesar) ve miristik asit (MA; C₁₃H₂₇COOH tetradekanoik asit, Aldrich) yağ asitleri kullanılmıştır. Kullanılan yağ asitlerinin erime sıcaklıkları sırasıyla KA için 29-33 °C, LA için 43-45 °C ve MA için 52-54 °C'dir. Sırasıyla erime ve katılma entalpileri LA için 183 ve 184 j/g, KA için 156 ve 154 j/g ve miristik asit için 187 ve 184 j/g'dir.

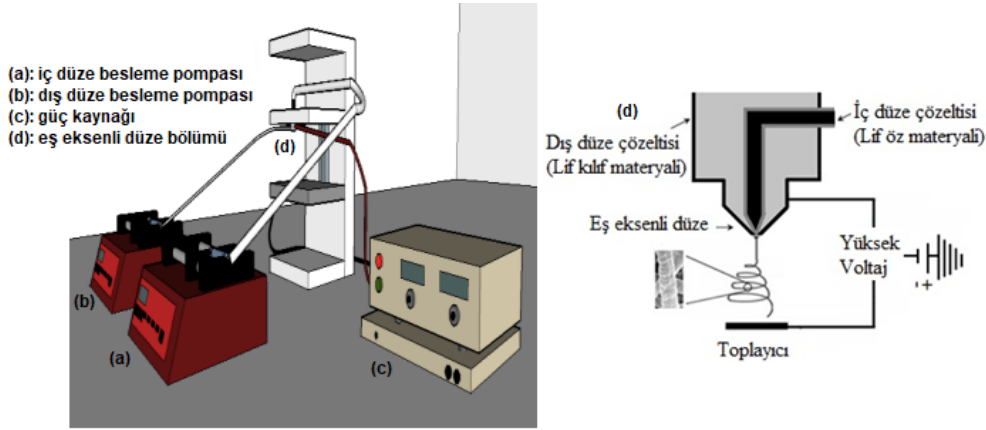
PMMA polimerini çözmek için etanol (Sigma Aldrich) ve kloroform (Sigma Aldrich) çözücü olarak kullanılmıştır. Yağ asidi/kloroform çözeltisinin iletkenliğini artırmak ve elektro statik eğrilebilirliğini geliştirmek için çözelti içerisine grafen nano partikülleri (grafen nano tabakalar, Nanografen) ilave edilmiştir.

3.2. Metotlar (Methods)

3.2.1. Nanolif Üretimi (Production of nanofiber)

Öz malzeme olarak yağ asidi, kılıf (kabuk) olarak polimetil metakrilat içeren nanolifler eş eksenli elektro lif çekim yöntemi ile üretilmiştir. Yöntemde, iki bileşenli öz/kılıf (bikomponent) veya içi boş nanolif yapı üretmek mümkündür. Bu sistemde dış düzenin içine eş eksenli ikinci bir iç düzeye yerleştirilmiştir. Şekil 1'de eş eksenli düzeye elektro lif çekim düzeneğine ait şematik görüntü ve fotoğraf verilmiştir. Eş eksenli (koaksiyel) elektro lif çekim işlemi, pratik olarak tek düzeli üretime benzerdir. Uygulanan voltaj ile birlikte duvar polimer çözelti damlası koni şeklini alır, itici kuvvetlerden dolayı uzar ve artan voltaj koninin ince lifler şeklinde uzamasını sağlar. Sonuçta, duvar çözeltisinde oluşan gerilimin yayılmasından dolayı öz yapıyı oluşturacak çözelti de koni şeklini alır. Böylece

koninin ucunda eş eksenli öz/kılıf yapıları nanolifler oluşur. Oluşan liflerin yapısındaki çözeltilerin buharlaşması sonucu katı halde nanolifler elde edilir (Özkayalar, 2019).



Şekil 1. Eş eksenli elektro lif çekim sistemine ait şematik görüntüler (Özkayalar, 2019) (Schematic representations of the coaxial electrospinning system)

Çalışmada, nanoliflerin öz maddesi olarak kaprik asit, laurik asit veya miristik asit, kılıf olarak ise PMMA (polimetil metakrilat) polimeri kullanılmıştır. PMMA polimeri 40 ml etanol ve 60 ml kloroform içeren çözücü karışımında çözülmüş ve polimer çözeltisinin konsantrasyonu % 16 (w/v) olacak şekilde ayarlanmıştır. Nanoliflerin öz maddesi olarak kullanılan kaprik asit, laurik asit ve miristik asit ise kloroform içinde çözünerek hazırlanmıştır. 30 ml kloroform içerisine 10 g yağ asidi ilave edilmiş ve karışım eş eksenli düzenin merkezindeki iç düzeden beslenmiştir. Bu çözeltinin iletkenliğini artırarak elektro eğrilebilirliğini geliştirmek için içerisine 0,4 g grafen ilave edilmiştir. Tablo 1’de nanoliflere ait üretim parametreleri ve koşulları verilmiştir. Üretimlerde elektrotlar arası mesafe, güç ve besleme hızı gibi parametreler denemeler yapılarak belirlenmiş ve lifin çekilebildiği koşullar tabloda belirtilmiştir. Nanolif tanımlamada % 16 konsantrasyonda PMMA çözeltisi PMMA16 kodu, grafen ise GA olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Öz/kılıf yapıları nanolif üretim parametreleri (Core/sheath structured nanofiber production parameters)

Numune	Kılıf/öz maddesi	Düze	İçerik	Elektrotlar arası mesafe (cm)	Besleme hızı ml/saat	Güç Kw
PMMA16	PMMA	Tek Düze	% 16 PMMA	11	4,90	1,71
PMMA16/MA	PMMA	Dış	% 16 PMMA	11	5	1,90
	MA	İç	Kloroform+MA (30 ml kloroform+ 10 gr MA)		5	
PMMA16/LA/GA	PMMA	Dış	% 16 PMMA	11	5	1,92
	LA+Grafen	İç	Kloroform+LA (30 ml kloroform+ 10 gr LA+0,4 g grafen)		5	
PMMA16/KA/GA	PMMA	Dış	% 16 PMMA	11	10	1,84
	KA+Grafen	İç	Kloroform+KA (30 ml kloroform+ 10 gr KA+0,4 g grafen)		5	
PMMA16/MA/GA	PMMA	Dış	% 16 PMMA	16	7,5	1,50
	MA+Grafen	İç	Kloroform+MA (30 ml kloroform+ 10 gr MA+ 0,4 grafen)		3,75	

3.2.2. Nanolif Karakterizasyonu (Characterization of Nanofiber)

Üretilen nanoliflerin morfolojisini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM, Quanta FEG 250 marka cihaz) analizi uygulanmıştır. Analizler öncesi nanoliflerin yüzeyi altın ile kaplanarak iletken yüzeyler elde edilmiştir. FT-IR analizi ile nanoliflerin kimyasal yapıları aydınlatılmıştır. Numunelerin FT-IR spektrumları KBr pellet tekniği ile hazırlanarak Perkin Elmer Spektrum BX cihazı kullanılarak 4000-400 cm^{-1} orta infrared

bölgesinde 2 cm⁻¹ aralığında kaydedilmiştir. Analiz sırasında tarama sayısı 16, çözünürlük 4 cm⁻¹ olarak ayarlanmıştır. DSC analizi ile nanoliflerin gizli ısı depolama ve yayma sıcaklık ve entalpi (enerji depolama kapasitesi) değerleri ölçülmüştür. DSC Perkin Elmer Fronter DSC cihazı kullanılarak 0 °C - +80 °C sıcaklıkları arasında 5 °C/d ısıtma/soğutma oranında azot (N₂) atmosferinde gerçekleştirilmiştir. DSC analizi sonuçlarına göre, üretilen nanoliflerin kapsülasyon oranı ve kapsülasyon verimliliği değerleri sırasıyla Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Kapsülasyon oranı (\%)} = \frac{\Delta H_m - \text{Nanolif}}{\Delta H_m - \text{FDM}} \times 100 \quad (\text{Eşitlik 1})$$

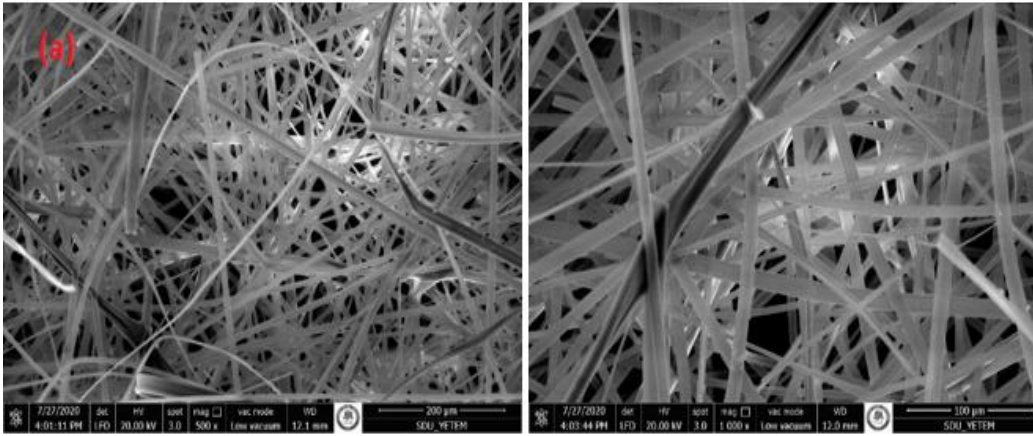
$$\text{Kapsülasyon verimliliği (\%)} = \frac{\Delta H_m - \text{Nanolif} + \Delta H_c - \text{Nanolif}}{\Delta H_m - \text{FDM} + \Delta H_c - \text{FDM}} \times 100 \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Nanoliflerin termal kararlılığını belirlemek için TGA (Termal gravimetrik analiz) yapılmıştır. Analizler, Perkin Elmer TGA7 cihazı kullanılarak 25-500 °C sıcaklık aralığında, argon gazı atmosferinde 10 °C/d ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

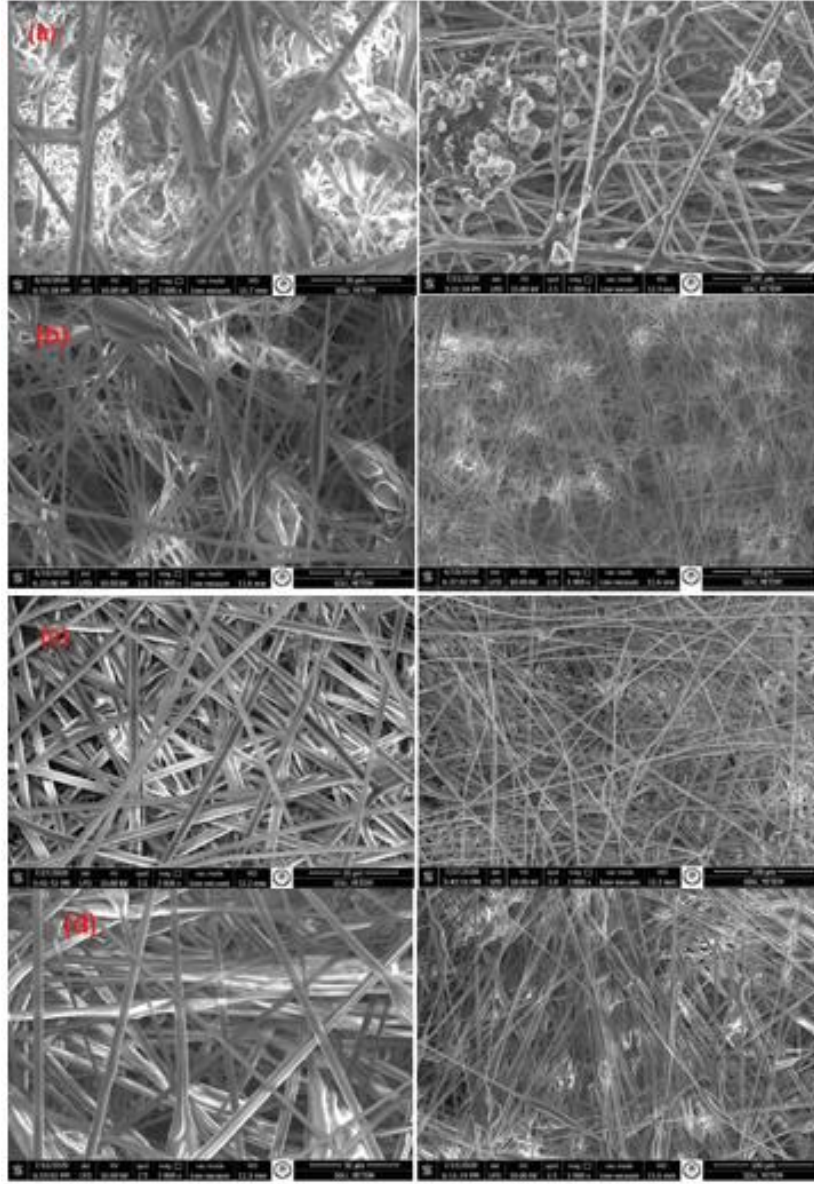
4.1. SEM Analizi Sonuçları (SEM Analysis Results)

Üretilen nanoliflerin morfolojilerini incelemek için SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de %16 konsantrasyonda saf PMMA çözeltisinden üretilen nanoliflere ait SEM görüntüleri (500X ve 1000X) verilmiştir. Görüntülerden nanoliflerin pürüzsüz yüzeye ve üniform çap dağılımına sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 2. Saf PMMA nanoliflerine ait SEM görüntüleri (a: PMMA16) (SEM images of the pure PMMA nanofibers)

Şekil 3'te, farklı tür yağ asidini öz madde olarak içeren, % 16 konsantrasyonda PMMA çözeltisinden çekilmiş kılıf yapıları kompozit nanoliflere ait görüntülere (3000 X ve 1000X) yer verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, grafen nano parçacıkları ilave edilmeden hazırlanan öz madde çözeltisinin (MA/kloroform) lif çekimi sırasında damlamaya neden olduğu, kesintisiz lif üretiminin gerçekleştirilemediği ve lifli yapı içerisinde çözelti kalıntılarının bulunduğu görülmektedir (Şekil 3a). Ancak, nanoliflerin öz maddesini oluşturan yağ asidi/kloroform çözeltisinin içerisine ilave edilen grafen nano parçacıklarının lif çekimini geliştirdiği ve düzgün yüzeyli, silindirik şekle sahip nanoliflerin üretilebildiği belirlenmiştir. SEM görüntülerinden, üretilen nanolifli yüzeyde yer yer boncuk oluşumunun gerçekleştiği de görülmektedir. Ayrıca lif çap dağılımlarının da homojen olduğu SEM görüntülerinden belirlenmiştir (Şekil 3b-d).

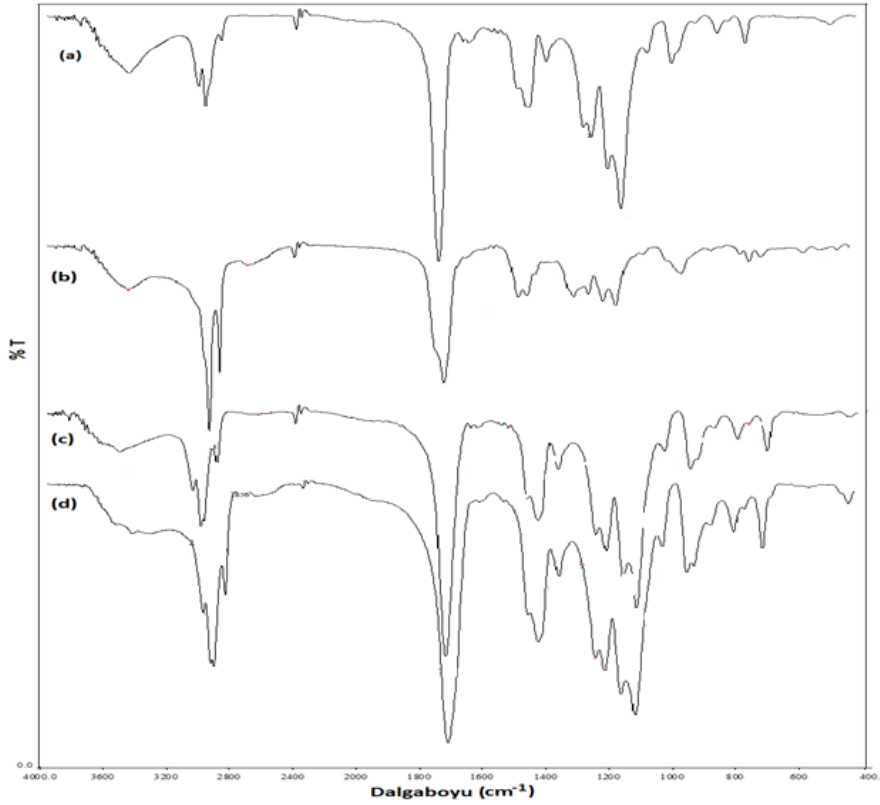


Şekil 3. PMMA/yağ asidi kompozit nanoliflere ait SEM görüntüleri (a: PMMA16/MA); b: PMMA16/LA/GA; c: PMMA16/KA/GA; d: PMMA16/MA/GA) (SEM images of PMMA/fatty acid composite nanofibers)

4.2. FT-IR spektroskopisi Analiz Sonuçları (FT-IR Spectroscopy Analysis Results)

PMMA duvarlı, yağ asidi özlü nanoliflerin kimyasal yapılarını analiz etmek için FT-IR spektroskopisi analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te nanoliflere ait FT-IR spektrumları verilmiştir. Yağ asitlerinin FT-IR analizine göre 2840-3000 cm^{-1} dalga boyu aralığındaki pikler simetrik ve asimetrik C-H gerilme pikleridir. Yaklaşık 1701 cm^{-1} dalga boyunda ortaya çıkan pik karbonil (C=O) grubuna ait gerilme pikidir. Ayrıca, 1000-1300 cm^{-1} dalga boyu aralığında ortaya çıkan pikler C-O gerilme pikleridir (Golestane vd., 2018; Sarı vd., 2019). Saf PMMA polimerinden üretilen nanoliflere ait FT-IR analizi bulgularına göre, 3000-2850 cm^{-1} dalga boyu aralığında ortaya çıkan pikler CH_3 grubundaki C-H gerilme piklerini temsil etmektedir. Yaklaşık 1700-1750 cm^{-1} civarında (genellikle 1730 cm^{-1} civarında) ortaya çıkan keskin pik polimerin yapısındaki karbonil (C=O) grubuna ait gerilme pikidir. Ayrıca 1100-1300 cm^{-1} dalga boylarında ortaya çıkan pikler C-O-C bağına ait karakteristik gerilme pikleridir (Hong vd., 2006; Lee ve Jan, 1996). Şekil 4'te verilen, nanoliflere ait IR spektrumları incelendiğinde, PMMA16/LA/GA kodlu nanolif spektrumunda C=O grubuna ait gerilme pikinin 1702 cm^{-1} dalga boyunda ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu durum, nanolif yapısında PMMA polimeri içerisine hapsedilmiş yüksek miktardaki laurik asit varlığı nedeniyle PMMA polimerine ait etkileşim piklerinin yağ asidi pikleri tarafından absorbe edilmesinden kaynaklanmaktadır (Alkan ve Sarı, 2008). Öte yandan PMMA16/KA/GA ve PMMA16/MA/GA liflerine ait spektrumda C=O grubu gerilme piki 1733 cm^{-1} 'de ortaya çıkmıştır. Bu durumun nanolif yapısı içerisinde hapsedilmiş yağ asitlerinin (KA ve MA) kütle fraksiyonlarının düşük olmasından kaynaklanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, saf PMMA nanoliflere ait spektrum ile kıyaslandığında, kompozit nanoliflere ait spektrumlarında yağ asidi varlığından kaynaklı

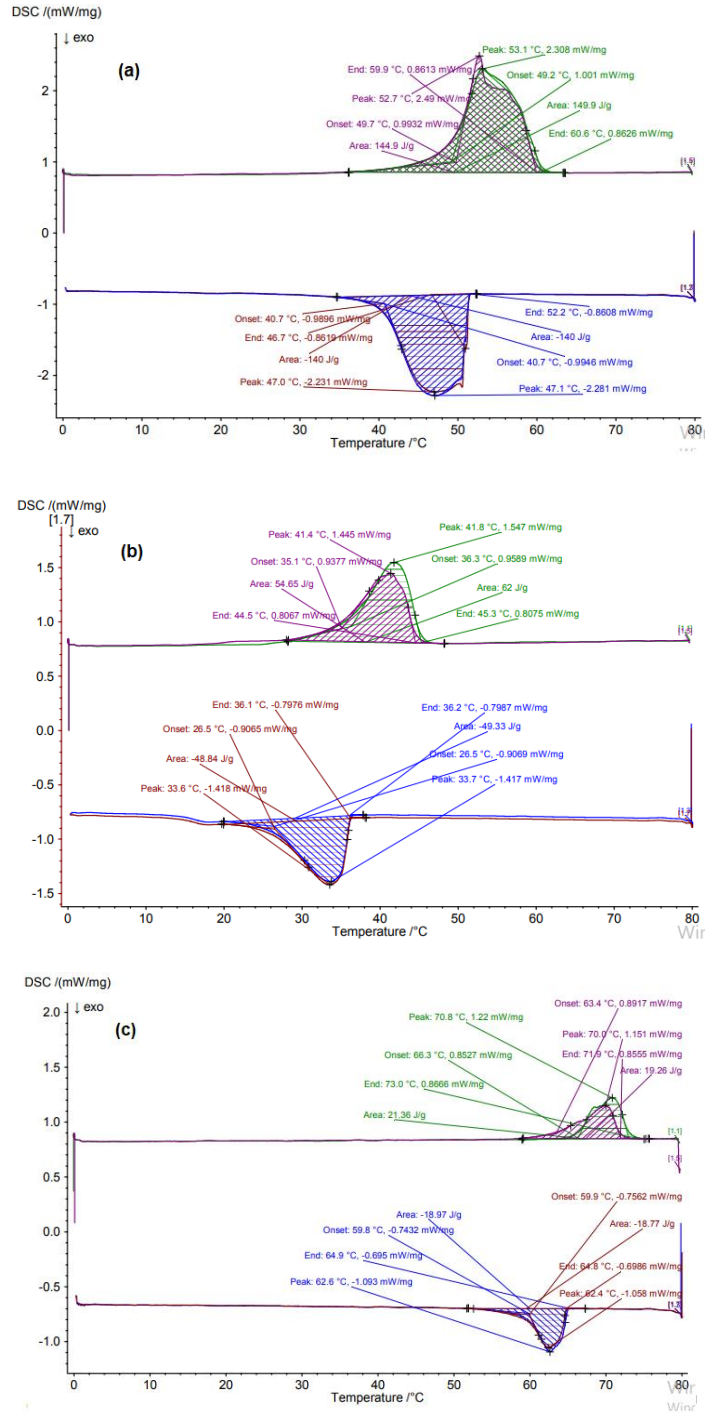
olarak 2840-3000 cm^{-1} dalga boyu aralığındaki piklerin şiddetinin arttığı, bunun hem polimer hem de yağ asitlerinin yapısındaki C-H gerilme piklerinin birleşmesinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4. Nanoliflere ait FT-IR spektrumları (a: PMMA16; b: PMMA16/LA/GA; c: PMMA16/KA/GA; d: PMMA16/MA/GA) (FT-IR spectra of the nanofibers)

4.3. DSC Analizi Sonuçları (DSC Analysis Results)

FDM özlü PMMA kılıflı nanoliflerin gizli ısı enerjisi depolama ve yayma sıcaklık ve kapasiteleri DSC analizi ile belirlenmiştir. DSC analizinden elde edilen eğriler Şekil 5'te ve bu eğrilerden alınan faz değişim sıcaklık ve entalpi değerleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi, öz madde içerisine iletken grafen ilave edilmeden üretilen, PMMA16/MA kodlu nanoliflerin ısı depolama/yayma özelliği sergilemedikleri belirlenmiştir. Bunun nedeni, elektro lif çekimine olanak sunacak düzeyde iletkenliğe sahip olmayan öz madde çözeltisinin lif çekimi sırasında damlaması sonucu öz/kılıf yapıları nanolif üretimini gerçekleştirilememiş olmasıdır. Söz konusu liflere ait SEM görüntülerinde de görüleceği gibi nanolif yapıları içerisinde öz madde damlaları görülmektedir. DSC analizi sonucuna göre de lifli yapı içerisinde alınan örnekler için gizli ısı depolama özelliği tespit edilememiş olup, öz maddenin PMMA kılıf içerisine hapsedilemediği sonucuna varılmıştır. Öte yandan öz maddeyi oluşturan yağ asidi/kloroform çözeltisi içerisine iletken grafen ilavesi sonucu kesintisiz olarak lif üretimini gerçekleştirilebildiği ve bu liflerin DSC analizi sonucu ısı depolama/yayma özelliği sergiledikleri belirlenmiştir. Tabloda verilen sonuçlara göre, laurik asit içeren PMMA16/LA/GA nanolifleri 144,9 j/g ısı depolama kapasitesine ve 140 j/g ısı yayma kapasitesine sahiptir ve ısı depolama ve yayma sıcaklıkları sırasıyla 49,7 °C ve 52,2 °C'dir. PMMA16/KA/GA kodlu kaprik asit içerikli lifler 35,1 °C'de 54,65 j/g ısı depolarken, 36,1 °C'de 48,8 j/g ısı yaymaktadır. Miristik asit içeren, PMMA16/MA/GA kodlu lifler ise 63,4 °C'de 19,26 j/g ısı depolama ve 64,8 °C'de 18,7 j/g ısı yayma kapasitesine sahiptir. Literatürde mevcut, farklı FDM ve polimer yapıları öz/kılıf yapıları nanolif termal özellikleri ile kıyaslandığında üretilen nanolifli yapıların termal enerji depolama kapasitelerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (McCann vd., 2006; Chen vd., 2013; Wan vd., 2016; Haghight vd., 2018). Nanoliflere ait kapsülasyon oranı ve verimliliği değerleri sırasıyla PMMA16/LA/GA nanolifleri için % 79,1 ve % 77,6, PMMA16/KA/GA nanolifleri için %35 ve %33,3 ve PMMA16/MA/GA nanolifleri için %10,2 ve % 10,1 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, yüksek enerji depolama kapasitesi esas alındığında PMMA duvar içerisine en iyi laurik asidin kapsülendiği ve PMMA16/LA/GA ile PMMA16/KA/GA nanolifli yapının etkili termal enerji depolama malzemeleri olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 5. Nanolif DSC eğrileri (a: PMMA16/LA/GA, b: PMMA16/KA/GA ve c: PMMA16/MA/GA) (DSC curves of the nanofibers)

Tablo 2. DSC analizi sonuçları (DSC analysis results)

Nanolif	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Katılma Sıcaklığı (°C)	Katılma Entalpisi (J/g)	Kapsülasyon oranı (%)	Kapsülasyon verimliliği (%)
PMMA16	-	-	-	-	-	-
PMMA16/MA	-	-	-	-	-	-
PMMA16/LA/GA	49,7	144,9	52,2	140,0	79,1	77,6
PMMA16/KA/GA	35,1	54,65	36,1	48,8	35,0	33,3
PMMA16/MA/GA	63,4	19,26	64,8	18,7	10,2	10,1

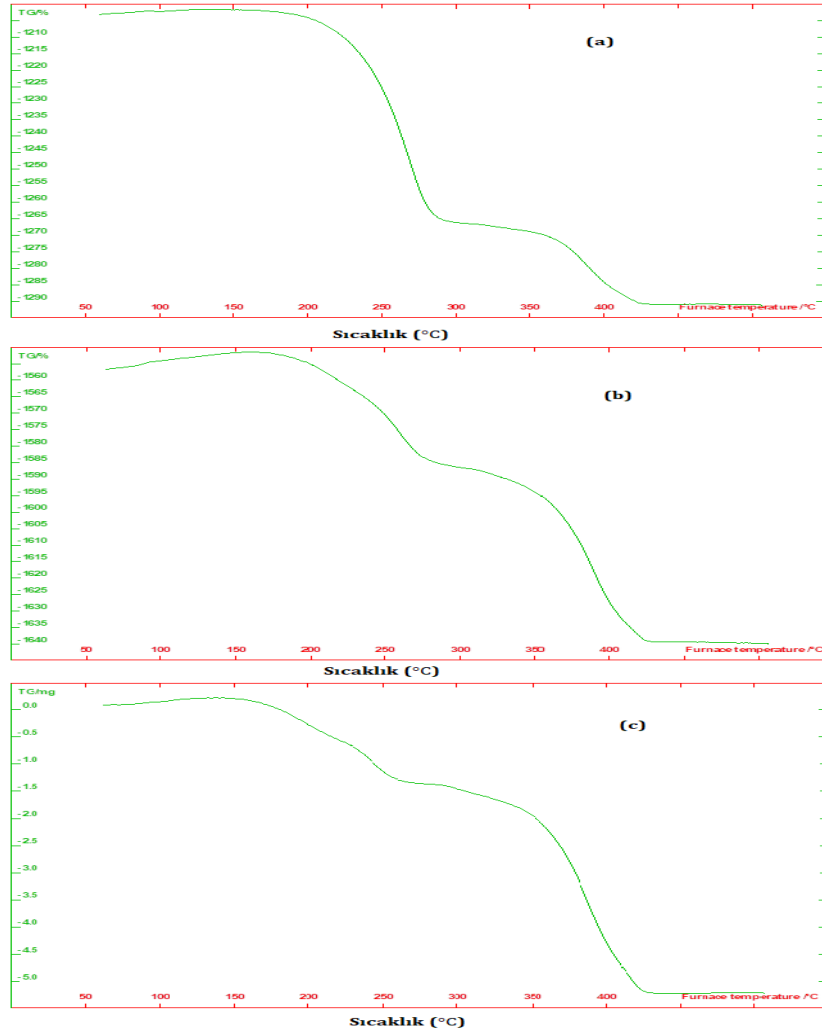
4.4. TG Analizi Sonuçları (TG Analysis Results)

Üretilen nanoliflerin ısıl kararlılıklarını belirlemek için termal gravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen TG eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. TGA eğrileri incelendiğinde, nanoliflerin iki basamaklı termal bozunmaya maruz kaldıkları görülmektedir. Tablo 3'de TG analizinden elde edilen veriler özetlenmiştir. Tablo ve eğrilere göre, PMMA16/LA/GA kodlu laurik asit içeren lif 236,2 °C'de bozunmaya başlamış ve ilk bozunma basamağında % 65,3 kütle kaybetmiştir. İkinci bozunma 363,8 °C'de başlamış ve bu basamakta toplam kütle kaybı % 23,7 olarak belirlenmiştir. PMMA16/KA/GA kodlu kaprik asit içeren kompozit nanolif için ilk bozunma 219,9 °C'de başlamış ve %34,9'luk kütle kaybı meydana gelmiştir. Aynı lifin ikinci basamak bozunması 357,6 °C'de başlamış ve %52,8 kütle kaybı ile sonlanmıştır. PMMA16/MA/GA kodlu miristik asit içeren kompozit nanolif için ilk bozunmanın başlama sıcaklığı 195,8 °C iken ikinci basamak bozunmanın başlama sıcaklığı 356,2 °C'dir. Bu lifin birinci ve ikinci bozunma basamaklarındaki kütle kayıp değerleri sırasıyla %26,7 ve %64,2 olarak belirlenmiştir. Nanoliflerin ikinci basamak bozunması ise lifin kılıf yapısını oluşturan PMMA polimerinin termal parçalanmasından kaynaklanmaktadır. PMMA polimerinden üretilen nanoliflere ait TG analiz sonuçlarına göre nanolifler 300 °C civarında meydana gelen tek basamaklı termal bozunma sergilemektedirler (Macossay vd., 2007; Carrizales vd., 2008; Pelfrey vd., 2010). Saf haldeki yağ asitlerinin termal bozunması kaprik asit için 110-240 °C, laurik asit için 160-260 °C ve miristik asit için 150-270 °C aralığında tek basamaklı olarak gerçekleşmektedir (Golestaneh, vd., 2018; Lin vd., 2018). Literatürde mevcut çalışmalarda yağ asidi-polimer kompozit FDM ürünler, saf polimerlere göre, yapılarındaki yağ asitlerinin varlığından dolayı iki basamaklı bozunma sergilemektedirler. Bu tür kompozit nanolifler için belirlenen ilk bozunma basamakları lif yapısındaki yağ asitlerinin molekül zincirlerinin parçalanarak yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada üretilen öz/kılıf yapılı, yağ asidi-PMMA kompozit nanoliflerin TG analiz sonuçlarına göre, yağ asitlerinin PMMA kılıf tarafından kapsüllenmesi termal dirençlerini artırmıştır. Bununla birlikte, liflerin ilk bozunma basamaklarındaki kütle kayıp oranları da DSC analizinde ölçülen entalpi değerleri dolayısıyla içerdikleri yağ asidi miktarları ile doğru orantılı olarak bulunmuştur. Bu bulgu TG analiz sonuçlarını desteklemektedir.

Tablo 3. TG analiz sonuçları (TG analysis results)

Nanolifler	1. Basamak			2. Basamak		
	Başlama (°C)	Bitiş (°C)	% kütle kaybı	Başlama (°C)	Bitiş (°C)	% kütle kaybı
PMMA16/LA/GA	236,2	282,9	65,3	363,8	389,2	23,7
PMMA16/KA/GA	219,9	277,3	34,9	357,6	411,2	52,8
PMMA16/MA/GA	195,8	256,5	26,7	356,2	412,7	64,2



Şekil 6. Nanoliflere ait TGA eğrileri (a: PMMA16/LA/GA; b: PMMA16/KA/GA; c: PMMA16/MA/GA (TGA curves of the nanofibers))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, eş eksenli düze (iç içe geçmiş iki düze) elektro lif çekim sistemi kullanılarak öz/kılıf yapılı, öz madde olarak faz değişim malzemesi içeren, ısı depolama ve yayma özellikli nanolif üretimi gerçekleştirilmiştir. Nanoliflerin yapısı PMMA kılıf tarafından sarılan yağ asidi esaslı FDM'den oluşmaktadır. FDM olarak kaprik asit (KA), laurik asit (LA) ve miristik asit (MA) yağ asitleri kullanılmıştır. Çalışmada, yağ asitlerinin kloroform içerisindeki çözeltilerinin lif çekimi için uygun olmadığı, ancak çözelti içerisine iletken grafen ilavesinin öz/kılıf yapılı nanolif üretimine olanak sağladığı belirlenmiştir. Üretilen nano liflerin düzgün yüzeyli, silindirik şekle ve homojen çapa sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek ısı depolama kapasitesi laurik asit içeren nanolifler için elde edilmiştir. Bu sonucun laurik asidin PMMA duvar içerisinde daha yüksek oranda kapsüllemesinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, özellikle laurik asit/PMMA ve kaprik asit/PMMA içerikli öz/kılıf yapılı nanoliflerin yüksek ısı depolama kapasitesine sahip termal enerji depolama malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Çalışmada, üretilen nanoliflerin iki basamaklı termal bozunmaya maruz kaldıkları ve ilk bozunma basamağının yapıdaki yağ asitlerinin molekül zincirlerinin parçalanmasından kaynaklandığı, ikinci basamak bozunmanın lif polimer yapısının bozunmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Kompozit lif yapısının yağ asitlerinin termal stabilitesini artırdığı tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Alkan, C., Sarı, A., 2008. Fatty acid/poly (Methyl Methacrylate)(PMMA) Blends As Form-Stable Phase Change Materials For Latent Heat Thermal Energy Storage. *Solar Energy*, 82,2, 118-124.
- Alkan, C., Günther, E., Hiebler, S., Himpel, M., 2012. Complexing Blends of Polyacrylic Acid-Polyethylene Glycol and Poly(ethylene-co-acrylic acid)-Polyethylene Glycol as Shape Stabilized Phase Change Materials. *Energy Conversion and Management*, 64, 364-370.
- Babapoor, A., Karimi, G., Golestaneh, S. I., Mezzin, M. A., 2017. Coaxial Electro-spun PEG/PA6 Composite Fibers: Fabrication and Characterization. *Applied Thermal Engineering*, 118, 398-407.
- Cai, Y., Ke, H., Lin, L., Fei, X., Wei, Q., Song, L., Hu, Y., Fong, H., 2012. Preparation, Morphology and Thermal Properties of Electrospun Fatty Acid Eutectics/Polyethylene Terephthalate Form-Stable Phase Change Ultrafine Composite Fibers for Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, 64, 245-255.
- Carrizales, C., Pelfrey, S., Rincon, R., Eubanks, T. M., Kuang, A., McClure, M. J., Bowlin, G. L., Macossay, J. 2008. Thermal and Mechanical Properties of Electrospun PMMA, PVC, Nylon 6, and Nylon 6, 6. *Polymers for Advanced Technologies*, 19(2), 124-130.
- Ceylan, İ., Zuhur, S., Gürel, A.E., 2017. Isı Depolama Yöntemleri ve Uygulamaları. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, Kasım-Aralık, 38-47.
- Chen, C., Zhao, Y., Liu, W., 2013. Electrospun Polyethylene Glycol/Cellulose Acetate Phase Change Fibers with Core–Sheath Structure for Thermal Energy Storage. *Renewable Energy*, 60, 222-225.
- Chen, C., Wang, L., & Huang, Y. 2008. Morphology and Thermal Properties of Electrospun Fatty Acids/Polyethylene Terephthalate Composite Fibers as Novel Form-Stable Phase Change Materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1382-1387.
- Dang, T. T., Nguyen, T. T. T., Chung, O. H., Park, J. S., 2015. Fabrication of Form-Stable Poly (Ethylene Glycol)-Loaded Poly (Vinylidene Fluoride) Nanofibers via Single and Coaxial Electrospinning. *Macromolecular Research*, 23(9), 819-829.
- Genç, E., 2016. Tekstil Uygulamaları İçin Fonksiyonel Duvarlı Mikrokapsül Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye.
- Giro-Paloma, J., Martinez, M., Gabeza, L., Fernandez, A., I., 2016. Types, Methods, Techniques and Applications for Microencapsulated Phase Changematerials (MPCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1059-1075.
- Golestaneh, S. I., Karimi, G., Babapoor, A., & Torabi, F. 2018. Thermal Performance of Co-Electrospun Fatty Acid Nanofiber Composites in the Presence of Nanoparticles. *Applied Energy*, 212, 552-564.
- Günerhan, H., 2004. Duyulur Isı Depolama ve Bazalt Taşı. *Mühendis ve Makina*, 530(45), 12-17.
- Haghighat, F., Ravandi, S. A. H., Esfahany, M. N., & Valipouri, A. 2018. A Comprehensive Study on Optimizing and Thermoregulating Properties of Core–Shell Fibrous Structures Through Coaxial Electrospinning. *Journal of Materials Science*, 53(6), 4665-4682.
- Hemmatian, B., Heidarzadeh, N., Fard, G. C., & Maleknia, L., 2020. Fabrication of Phase-Change Core/Shell Nanofibers Based on a Eutectic Fatty Acid Mixture to Control Body Temperature Fluctuations. *Materials Chemistry and Physics*, 122738.
- Hong, R. Y., Qian, J. Z., Cao, J. X., 2006. Synthesis and Characterization of PMMA Grafted ZnO Nanoparticles. *Powder Technology*, 163(3), 160-168.
- Hu, W., Yu, X., 2014. Thermal and Mechanical Properties of Bio-Based PCMs Encapsulated with Nanofibrous Structure. *Renewable Energy*, 62, 454-458.
- Lee, D. C., Jang, L. W., 1996. Preparation and Characterization of PMMA–Clay Hybrid Composite by Emulsion Polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 61(7), 1117-1122.
- Lin, Y., Zhu, C., Alva, G., & Fang, G. 2018. Microencapsulation and Thermal Properties of Myristic Acid with Ethyl Cellulose Shell for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, 231, 494-501.
- Lu, Y., Xiao, X., Zhan, Y., Huan, C., Qi, S., Cheng, H., Xu, G., 2018. Core-Sheath Paraffin-Wax-Loaded Nanofibers by Electrospinning for Heat Storage. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(15), 12759-12767.
- Lu, Y., Xiao, X., Fu, J., Huan, C., Qi, S., Zhan, Y., Zhu, Y., Xu, G., 2019. Novel Smart Textile with Phase Change Materials Encapsulated Core-Sheath Structure Fabricated by Coaxial Electrospinning. *Chemical Engineering Journal*, 355, 532-539.
- Macossay, J., Marruffo, A., Rincon, R., Eubanks, T., & Kuang, A. 2007. Effect of Needle Diameter on Nanofiber Diameter and Thermal Properties of Electrospun Poly (Methyl Methacrylate). *Polymers for Advanced Technologies*, 18(3), 180-183.
- McCann, J.T., Marquez, M., Xia, Y.N., 2006. Melt Coaxial Electrospinning: A Versatile Method for The Encapsulation of Solid Materials and Fabrication of Phase Change Nanofibers. *Nano Letters*, 6, 2868–2872.
- Mondal, S., 2008. Phase Change Materials for Smart Textiles-an Overview. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536-50.
- Noyan, E. C., Onder, E., Sarier, N., Arat, R., 2018. Development of Heat Storing Poly(Acrylonitrile) Nanofibers by Coaxial Electrospinning. *Thermochimica Acta*, 662, 135-148.
- Özkayalar, S., 2019. Çift Duvarlı Faz Değiştiren Madde Çekirdekli Nano ve Mikrokapsüllerin Üretimi ve Tekstil Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye.
- Pelfrey, S., Cantu, T., Papantonakis, M. R., Simonson, D. L., McGill, R. A., & Macossay, J. 2010. Microscopic and Spectroscopic Studies of Thermally Enhanced Electrospun PMMA Micro-and Nanofibers. *Polymer Chemistry*, 1(6), 866-869.
- Qian, T., Li, J., Min, X., Guan, W., Deng, Y., Ning, L., 2015. Enhanced Thermal Conductivity of PEG/Diatomite Shape-Stabilized Phase Change Materials With Ag Nanoparticles For Thermal Energy Storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(16), 8526-8536.
- Sarı, A., Bicer, A., Al-Sulaiman, F. A., Karaipekli, A., Tyagi, V. V., 2018. Diatomite/CNTs/PEG Composite PCMs with Shape-Stabilized and Improved Thermal Conductivity: Preparation and Thermal Energy Storage Properties. *Energy and Buildings*, 164, 166-175.
- Sarı, A., Bicer, A., Alkan, C., Özcan, A. N., 2019. Thermal Energy Storage Characteristics of Myristic Acid-Palmitic Eutectic Mixtures Encapsulated in PMMA Shell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 1-6.

- Sarier, N., Arat, R., Menciloglu, Y., Onder, E., Boz, E. C., Oguz, O., 2016. Production of PEG Grafted PAN Copolymers and Their Electrospun Nanowebs As Novel Thermal Energy Storage Materials. *Thermochimica Acta*, 643, 83-93.
- Sun, S-X., Xie, R., Wang, X-X., Wen, G-Q., Liu, Z., Wang, W., Ju, X-J., Chu, L-Y., 2015. Fabrication of Nanofibers with Phase-Change Core and Hydrophobic Shell, via Coaxial Electrospinning Using Nontoxic Solvent. *Journal of Materials Science*, 50(17), 5729-5738.
- Şentürk, S. B., Kahraman, D., Alkan, C., Gökçe, İ., 2011. Biodegradable PEG/Cellulose, PEG/Agarose and PEG/Chitosan Blends as Shape Stabilized Phase Change Materials for Latent Heat Energy Storage. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 141-144.
- Van Do, C., Nguyen, T. T. T., Park, J. S., 2013. Phase-Change Core/Shell Structured Nanofibers Based on Eicosane/Poly(Vinylidene Fluoride) For Thermal Storage Applications. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(7), 1403-1409.
- Wan, Y., Zhou, P., Liu, Y., & Chen, H., 2016. Novel Wearable Polyacrylonitrile/Phase-Change Material Sheath/Core Nano-Fibers Fabricated By Coaxial Electro-Spinning. *RSC Advances*, 6(25), 21204-21209.
- Wu, Y., & Wang, T., 2015. Hydrated Salts/Expanded Graphite Composite with High Thermal Conductivity as A Shape-Stabilized Phase Change Material For Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, 101, 164-171.
- Zdraveva, E., Fang, J., Mijovic, B., Lin, T., 2015. Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)/Phase Change Material Fibers: Morphology, Heat Properties, And Stability. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(35), 8706-8712.
- Zhang, Y., Zheng, S., Zhu, S., Ma, J., Sun, Z., Farid, M., 2018. Evaluation of Paraffin Infiltrated in Various Porous Silica Matrices as Shape-Stabilized Phase Change Materials For Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, 171, 361-370.



HARİCİ REENFEKSİYONLARA BAĞLI TÜBERKÜLOZUN UYARLAMALI KALMAN FİLTRE TEMELLİ OPTİMAL KONTROLÜ

Meriç ÇETİN^{1*}, Selami BEYHAN²

¹ Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Üçkuyular Mevki, Gürsel Aksel Blv. Karabağlar, İzmir, Türkiye.

Anahtar Kelimeler

*Optimal Kontrol,
Uyarlamalı Kontrol,
Kalman Filtre,
Tüberküloz,
Harici Reenfeksiyon.*

Öz

Tüberküloz gibi epidemiyolojik hastalıkları matematiksel modeller üzerinden incelemek hastalığın gelecekteki dinamiklerini yorumlamak için faydalıdır. Bu modellerin varlığında, hastalığı ortadan kaldıracak stratejileri hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, aktif tüberkülozlu, evde ya da hastanede tedavi edilen bireylerde ölçülemeyen tüberküloz dinamiklerini kontrol etmek için uyarlanabilir kokusuz bir Kalman filtre (UKKF) tabanlı optimal denetleyici tasarlanmıştır. Harici reenfeksiyona bağlı tüberküloz hastalarının evde ve hastanede tedavi görmeleri durumunun incelenmesi, optimal tedavi seçenekleri araştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede küçük bir bulaşıcı insan grubu varlığında bile hastalığın uzun vadede kalıcı olmasının önüne geçileceği düşünülmektedir. Tüberküloz modelinden elde edilen tahmin ve kontrol sonuçlarına göre, tasarlanan uyarlanabilir optimal denetleyicinin, bulaşıcı virüs taşıyan kişilerin eve ya da hastaneye geçişi için doğru kararlar verebilecek nitelikte olduğu kanısına varılmıştır.

ADAPTIVE KALMAN FILTERING BASED OPTIMAL CONTROL OF TUBERCULOSIS DYNAMICS WITH EXOGENOUS REINFECTIONS

Keywords

*Optimal Control,
Adaptive Control,
Kalman Filter,
Tuberculosis,
Exogenous Reinfection.*

Abstract

Examining epidemiological diseases such as tuberculosis through mathematical models is useful for interpreting the future dynamics of the disease. In the presence of these models, it is possible to calculate strategies that can exterminate the disease. In this study, an adaptive unscented Kalman filter (AUKF) -based optimal controller has been designed to control unknown tuberculosis dynamics in individuals treated with active tuberculosis, at home or in hospital. The investigation of the treatment of tuberculosis patients at home and in hospital due to exogenous reinfections helps to search for optimal treatment options. In this way, even in the presence of a small group of infectious people, the long-term persistence of the disease is thought to be prevented. According to the estimation and control results obtained from the tuberculosis model, it was concluded that the designed adaptive optimal controller was able to make the right decision about the transfer of infected persons to the home or to the hospital.

Alıntı / Cite

Çetin, M., Beyhan, S., (2020). Harici Reenfeksiyonlara Bağlı Tüberkülozun Uyarlamalı Kalman Filtre Temelli Optimal Kontrolü, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1260-1268.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Çetin, 0000-0002-7871-4850
S. Beyhan, 0000-0002-9581-2794

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	09.04.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	28.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.11.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: mçetin@pau.edu.tr, +90-258-296-3208

1. Giriş (Introduction)

Tüberküloz (TB), gizli dönemi yıllarca sürebilen, yavaş seyreden ve en çok ölüme neden olan epidemiyolojik hastalıklardandır (Waalder et al. 1962, Castillo-Chavez and Feng 1997, Khajanchi et al. 2008). Son yıllarda diyabet, sigara, HIV enfeksiyonu, alkol tüketimi vb. nedeniyle enfekte olmuş kişilerindeki hastalığın harici (exogenous) reenfeksiyon ve içten kaynaklanan (endogenous) reaktivasyon nedeniyle enfeksiyöz/bulaşıcı safhaya ilerlemesi söz konusu olmaktadır. Öte yandan, iyileştirilebilir bir hastalık olan TB'de HIV-negatif insanlar arasında bile pek çok kişinin tedavisi başarılı olmuştur (WHO 2017). Tüberküloz gibi epidemiyolojik hastalıkların matematiksel modellerle analizi hastalığa yakalanmış kişilere uygun tedavilerin sunulabilmesi veya hayat standartlarının iyileştirilmesi açısından son derece önemlidir (Hethcote 2000, Earn et al. 2008, Silva and Torres 2015). Bu süreçlerin etkin bir şekilde yürütülebilmesi için tıp bilimleri, temel bilimler ve mühendislik disiplinlerinin işbirliği içinde olması gerekmektedir.

Optimal kontrol yaklaşımları, doğrusal kontrol teorisindeki temel yöntemlerdendir (Liang 2017). Bununla birlikte, doğrusal-olmayan sistemleri kontrol etmek için yaklaşık yöntemler de geliştirilmiştir (Cetin and Beyhan 2019, Gao and Huang 2018). Kalman tipi filtreler sınıfında, kokusuz Kalman filtresi (UKF) jacobian bilgilerini kullanmadan ve sistemi doğrusallaştırmaya gerek kalmadan yüksek performanslı çalışabilmektedir (Julier and Uhlmann 2004). Doğrusal-olmayan sistem için bilinmeyen dinamiklerin tahminini sağlayan UKF, gürültülü koşullar altında da genişletilmiş Kalman filtresinden daha iyi doğruluk, daha az hesaplama yükü ve daha hızlı yakınsama sağlamaktadır (Wan and Merwe 2000). Ek olarak, uyarlanabilir UKF yaklaşımları, sisteminin geleneksel UKF'ye kıyasla güçlü gürültülü ölçümler altında tahminini garantilemektedir (Hajiyev and Soken 2014).

Bu çalışmada, uyarlanabilir kokusuz Kalman filtre tabanlı optimal denetleyici, tüberküloz modelini kontrol etmek üzere tasarlanmıştır. Buradaki katkı, (Huo and Zou 2016) çalışmasında önerilen ve harici reenfeksiyonların eklenmesiyle (Yıldız and Karaoğlu 2019) çalışmasında genişletilmiş hali sunulan tüberküloz dinamiklerindeki ölçülemeyen durumların kestirimi ve stabilizasyonudur. Bu sayede küçük bir bulaşıcı insan grubu varlığında bile hastalığın uzun vadede kalıcı olmasının önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

2. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu çalışmada 2016 yılında önerilen (Huo and Zou 2016) ve daha sonra aktif TB gelişmesinde önemli bir faktör olan harici reenfeksiyonun eklenmesiyle genişletilen bir tüberküloz modeli (Yıldız and Karaoğlu 2019) üzerinde çalışılmıştır. Tedavi edilen TB için ömür boyu bağışıklık sağlanmamaktadır, bu nedenle genişletilen yeni TB modelinde iyileşmiş bireylerin yeniden enfekte olma olasılığı aşağıdaki şekilde sunulmuştur:

$$\begin{aligned}
 \dot{S}(t) &= \Lambda - (\beta_1 I_1(t) + \beta_2 I_2(t))(1 - u_1) \frac{S(t)}{N(t)} - \mu S(t), \\
 \dot{E}(t) &= (\beta_1 I_1(t) + \beta_2 I_2(t))(1 - u_1) \frac{S(t)}{N(t)} - (\alpha_1 \beta_1 I_1(t) + \alpha_2 \beta_2 I_2(t)) \frac{E(t)}{N(t)} \\
 &\quad + (\gamma_1 \beta_1 I_1(t) + \gamma_2 \beta_2 I_2(t)) \frac{R(t)}{N(t)} - (\theta + \varepsilon + \mu) E(t), \\
 \dot{I}_1(t) &= \theta E(t) + w_2 I_2(t) + \alpha_1 \beta_1 \frac{E(t) I_1(t)}{N(t)} - (w_1 + k_1 + u_2 + \mu + d_1) I_1(t), \\
 \dot{I}_2(t) &= \varepsilon E(t) + w_1 I_1(t) + \alpha_2 \beta_2 \frac{E(t) I_2(t)}{N(t)} - (w_2 + k_2 + u_3 + \mu + d_2) I_2(t), \\
 \dot{R}(t) &= (k_1 + u_2) I_1(t) + (k_2 + u_3) I_2(t) \\
 &\quad - (\gamma_1 \beta_1 I_1(t) + \gamma_2 \beta_2 I_2(t)) \frac{R(t)}{N(t)} - \mu R(t), \\
 N(t) &= S(t) + E(t) + I_1(t) + I_2(t) + R(t).
 \end{aligned} \tag{1}$$

burada, $S(t)$ TB hastalığı için duyarlı grupları, $E(t)$ gizli, tüberkülozlu fakat bulaşıcı olmayan bireyleri, $I_1(t)$ aktif TB'si olan ve evde tedavi edilen bireyleri, $I_2(t)$ aktif TB'si olan ve hastanede tedavi edilen bireyleri, $R(t)$ ise iyileşen bireyleri temsil etmektedir [14]. TB hastalık dinamiklerinde geçen kontrol işaretlerinden $u_1(t)$, duyarlı bireylerin yeni enfeksiyonlardan korunma çabasını, $u_2(t)$, aktif TB bulaşıcı bireyler için evde tedavinin başarısızlığını önleme çabasını ve $u_3(t)$, aktif TB bulaşıcı bireyler için hastanede tedavi başarısızlığını önleme çabasını temsil eder. Huo ve Zou çalışmasının genişletilmiş modeli olarak önerilen (1) dinamiklerinde sağlık tesislerinin sınırlı olduğu ve kaynak fakiri ülkelerde yaşayan insanlar için hastanede tedavi karşılanamaması durumunda evde veya hastanede tedaviye devamın etkisi incelenmektedir. Bu çalışmada, Eşitlik (1)'deki TB modeline ait parametrelerin değerleri Tablo 1'de listelenmiştir. Bunun yanında, model için kullanılan örnekleme zamanı, kontrol işaretlerinin sınırları, başlangıç koşulları ve durumlara ait başlangıç koşullarının tamamı (Yıldız and Karaoğlu 2019) çalışmasında verildiği şekliyle kullanılmıştır.

Tablo 1. Tüberküloz model parametreleri (Yıldız and Karaoğlu 2019)(Tuberculosis model parameters)

Parametre	Tanımı	Değeri	Birimi
Λ	Rekrutman oranı	4000	$insan\ yil^{-1}$
β_1	I_1 sınıfı ile temas için iletim hızı	10	yil^{-1}
β_2	I_2 sınıfı ile temas için iletim hızı	2	yil^{-1}
μ	Doğal ölüm oranı	1/70	yil^{-1}
α_1	I_1 sınıfı için yeniden bulaşma düzeyi	0.4	-
α_2	I_2 sınıfı için yeniden bulaşma düzeyi	0.2	-
θ	E 'den I_1 sınıfına ilerleme hızı	0.985	yil^{-1}
ε	E 'den I_2 sınıfına ilerleme hızı	0.015	yil^{-1}
w_1	I_1 sınıfından I_2 'ye ilerleme hızı	0.001 veya 0.8	yil^{-1}
w_2	I_2 sınıfından I_1 'e ilerleme hızı	0.001 veya 0.8	yil^{-1}
k_1	I_1 sınıfı için tedavi oranı	0.03	yil^{-1}
k_2	I_2 sınıfı için tedavi oranı	0.8	yil^{-1}
d_1	I_1 sınıfı için hastalığa bağlı ölüm oranı	0.1	yil^{-1}
d_2	I_2 sınıfı için hastalığa bağlı ölüm oranı	0.02	yil^{-1}
γ_1	I_1 sınıfı için tedavi edilen hastaların harici reenfeksiyon oranı	0.01	-
γ_2	I_2 sınıfı için tedavi edilen hastaların harici reenfeksiyon oranı	0.025	-

3. Uyarlanabilir Kokusuz Kalman Filtre (Adaptive Unscented Kalman Filter)

Doğrusal-olmayan bir sistemin ayrık zamanlı durum-uzayı gösterimini düşünelim:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= g(x_k, u_k) + w_k, \\ y_k &= h(x_k, u_k) + v_k \end{aligned} \quad (2)$$

burada $x_k \in \mathcal{R}^N$, $u_k \in \mathcal{R}^{R_u}$ ve $y_k \in \mathcal{R}^{Q_y}$, sırasıyla, durum vektörünü, kontrol işaretini ve çıkış işaretini göstermektedir. $w_k \sim N(\mathbf{0}, Q_k)$ Gaussian süreç gürültüsünü ve $v_k \sim N(\mathbf{0}, R_k)$ Gaussian ölçüm gürültüsünü ifade eder. Eşitlik (2) ile tanımlanan sistemin kontrol edilebilir ve gözlenebilir olduğu varsayılmaktadır. Uyarlanabilir UKF durum kestirimi sürecinde ölçülemeyen x_k durumları yinelemeli en büyük olasılık tahminine dayanarak hesaplanmaktadır. Durum değişkenleri (x_k) ve kovaryans matrislerini (P_k^x, Q_k, R_k) içeren artırılmış durum matrisleri şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} x_k^{aug} &= [x_k \quad w_k \quad v_k]^T, \\ P_k^{aug} &= \begin{bmatrix} P_k^x & 0 & 0 \\ 0 & Q_k & 0 \\ 0 & 0 & R_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

UKF, doğrusal-olmayan aykırılıkları gösterebilmek için bir dizi örneğin olasılıksal ortalama ve varyansını hesaplayan bir sigma-noktası Kalman filtresidir. UKF, seçilen sigma noktalarını sistemin doğrusal-olmayan dinamikleri aracılığıyla yayar ve daha sonra ortalama ve kovaryansa özyinelemeli olarak yaklaşır. UKF algoritması için $2L + 1$ sigma noktası tanımlanmalıdır; burada L , süreç ve ölçüm gürültüsü dahil olmak üzere artırılmış durumların toplam sayısıdır. UKF prosedürü için kullanılan değişken tanımlarını şu şekildedir: W_i bir dizi skaler ağırlıktır ($i = 1, \dots, 2L$). $W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{(L+\lambda)}$, $W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{(L+\lambda)+(1-\zeta^2+\beta)}$, $W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{(2(L+\lambda))}$. $\lambda = L(\zeta^2 - 1)$ ve $\eta = \sqrt{(L + \lambda)}$ ölçekleme parametreleridir. ζ sabiti, sigma noktalarının x_k civarında yayılmasını belirtir ve genellikle 0.0001 ila 1 aralığında ayarlanır. β , x_k 'nin Gauss dağılımına ilişkin önceki bilgileri eklemek için kullanılır ($\beta = 2$ optimal değeridir). Eşitlik (2) ile tanımlanan sistem için uyarlanabilir UKF tahmin süreci aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Durum vektörü ve kovaryans matrisinin başlangıç değerleri

$$\begin{aligned} x_0 &= E[x_0], \\ P_0 &= E[(x_0 - x_0)(x_0 - x_0)^T], \\ R_0 &= E[(x_0 - x_0)(x_0 - x_0)^T]. \end{aligned} \quad (4)$$

şekindedir. L -boyutlu durum vektörü için, X_{k-1} 'a ait sigma noktaları aşağıdaki şekilde hesaplanır

$$X_{k-1} = [\hat{x}_{k-1} \quad \hat{x}_{k-1} + \eta\sqrt{P_{k-1}} \quad \hat{x}_{k-1} - \eta\sqrt{P_{k-1}}]^T. \quad (5)$$

Sigma noktaları, ilişkili ağırlıklar ile çarpılarak doğrusal-olmayan sistem modeli aracılığıyla yayılır ve artırılmış durum değişkeninin bir kestirimini elde etmek için toplanır. Daha sonra bu değişkenler kovaryans matrisi ve çıktı değerinin kestirimini ("Zaman Güncelleme") ayarlamak için kullanılır.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k|k-1} &= g[\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}], \\ \hat{x}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} X_{i,k|k-1}, \\ P_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-][X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-]^T + Q \end{aligned} \quad (6)$$

Uyarlamalı UKF prosedüründe, çoğunlukla, R matrisinin uyarlanması diğer gürültü kovaryans matrislerinin uyarlanmasına göre daha üstündür (Das et al. 2015). Bu nedenle, yapılan çalışmada sadece R için bir adaptasyon tekniği kullanılmıştır. R_k uyarlamasında, \mathbf{X}_{1_k} sigma noktaları şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\mathbf{X}_{1_{k-1}} = [\hat{x}_k \quad \hat{x}_k + \eta\sqrt{P_k} \quad \hat{x}_k - \eta\sqrt{P_k}]^T. \quad (7)$$

$h(\cdot)$ aracılığıyla $\mathbf{X}_{1_{k-1}}$ dönüştürülür ve ölçüm şu şekilde tahmin edilir

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{k|k-1} &= h[\mathbf{X}_{1_{k-1}}], \\ \hat{y}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} Y_{i,k|k-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

$\xi_k = (y_k - y_k^-)$ uyarlama terimi olmak üzere P_ξ uyarlama kovaryans terimi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} P_\xi &= \frac{1}{k_w} \sum_{i=k-k_w+1}^k (\xi_k)^T (\xi_k), \\ &\text{eğer } k < ws \Rightarrow k_w = k, \\ &\text{eğer } k \geq ws \Rightarrow k_w = ws, \end{aligned} \quad (9)$$

burada ws kayan bir pencere ile adaptasyon terimini ve artık (residual) kovaryansı hesaplayan pencere boyutudur. Daha sonra R_k bileşenleri şu şekilde tahmin edilebilir:

$$\begin{aligned} R_k &= |P_\xi - \sum_{i=0}^{2L} [Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-][Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-]^T|, \\ R_{km} &= (1 - \delta)R_{(k-1)m} + \delta R_k, \end{aligned} \quad (10)$$

burada δ , $0 < \delta < 1$ aralığındaki modülasyon faktörüdür. UKF algoritmasının bir sonraki adımı "Ölçüm Güncellemesi" dir. Bu düzeltme adımında bir otokorelasyon matrisi ve bir çapraz korelasyon matrisi oluşturulur. Bu değişkenler daha sonra düzeltilmiş durum tahmini, kovaryans matrisi ve Kalman kazanç matrisini (K_k) hesaplamak için kullanılır.

$$\begin{aligned} P_{\bar{y}_k \bar{y}_k} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-][Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-]^T + R_{km} \\ P_{x_k y_k} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-][Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-]^T, \\ K_k &= P_{x_k y_k} P_{\bar{y}_k \bar{y}_k}^{-1}, \quad x_k = x_k^- + K_k(y_k - y_k^-), \\ P_k &= P_k^- - K_k P_{\bar{y}_k \bar{y}_k} K_k^T. \end{aligned} \quad (11)$$

4. Doğrusal-olmayan Optimal Kontrol (Nonlinear Optimal Control)

Sözde-doğrusal (pseudo-linear) formda da yazılabilen $x = g(x, u, t)$ biçimindeki doğrusal-olmayan bir sistem düşünelim:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x)x + B(x)u, \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \quad (12)$$

burada $x \in \mathbb{R}^N$, $u \in \mathbb{R}^{R_u}$, $A(x) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ve $B(x) \in \mathbb{R}^{N \times R_u}$ şeklindedir. Tüberküloz modelinde durum kestirimleri kullanılarak en aza indirilecek maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$J = \frac{1}{2} x^T(t_f) F x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q_c(x) x + u^T R_c u) dt \quad (13)$$

Burada F ve $Q_c \in \mathbb{R}^{N \times N}$ pozitif-yarı tanımlı ve $R_c \in \mathbb{R}^{R_u \times R_u}$ pozitif-tanımlı matrislerdir. J değerinin en aza indirilmesi Denklem (12)'deki kısıtlamaya tabi olan yinelemeli doğrusal zamanla değişen (LTV) yaklaşımlar kullanılarak sağlanabilir. Bu aşamadan sonra optimal kontrol problemi, k . yaklaşık sistem için doğrusal bir kuadratik regülatör (LQR) kontrol tasarımı haline dönüşür.

$$\begin{aligned} x^{[k]} &= A(x^{[k-1]}(t))x^{[k]} + B(x^{[k-1]}(t))u^{[k]}, \quad x^{[k]}(0) = x_0 \\ J &= \frac{1}{2}x^{T[k]}(t_f)Fx^{[k]}(t_f) + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f} (x^{T[k]}Q_c(x^{[k-1]}(t))x^{[k]} + u^{T[k]}R_c(x^{[k-1]}(t))u^{[k]})dt, \end{aligned} \quad (14)$$

Optimal bir kontrol probleminin LTV yaklaşımı için optimal kontrol giriş değeri:

$$u^{[k]} = -R_c^{-1}B^T(x^{[k-1]}(t))P_c^{[k]}x^{[k]}(t), \quad (15)$$

şeklindedir, burada, $P_c^{[k]}$, t_f ile t_0 arasında verilen Riccati denkleminin geriye dönük çözümüdür:

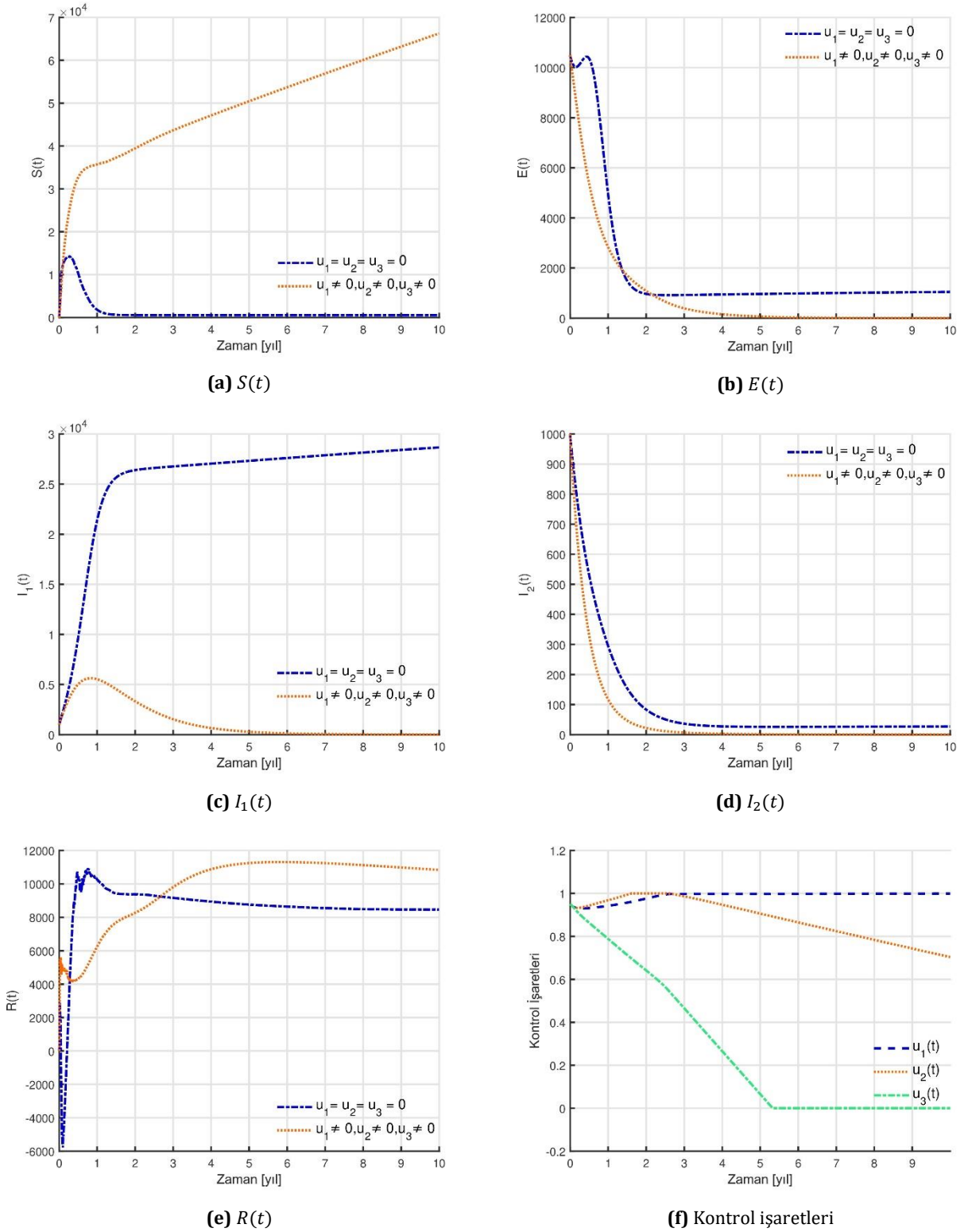
$$\dot{P}^{[k]} = -Q_c - P_c^{[k]}A(x^{[k-1]}(t)) - A(x^{[k-1]}(t))^T P_c^{[k]} + P_c^{[k]}B(x^{[k-1]}(t))R_c^{-1}B(x^{[k-1]}(t))^T P_c^{[k]}, \quad (16)$$

burada $P_c^{[k]}(t_f) = F$ şeklindedir. Optimal denetleyicinin kararlılığı (Itik 2016) çalışmasında ve uyarlamalı UKF tabanlı optimal denetleyicinin yakınsaması ise (Hajiyev and Soken 2014) çalışmasında gösterilmiştir.

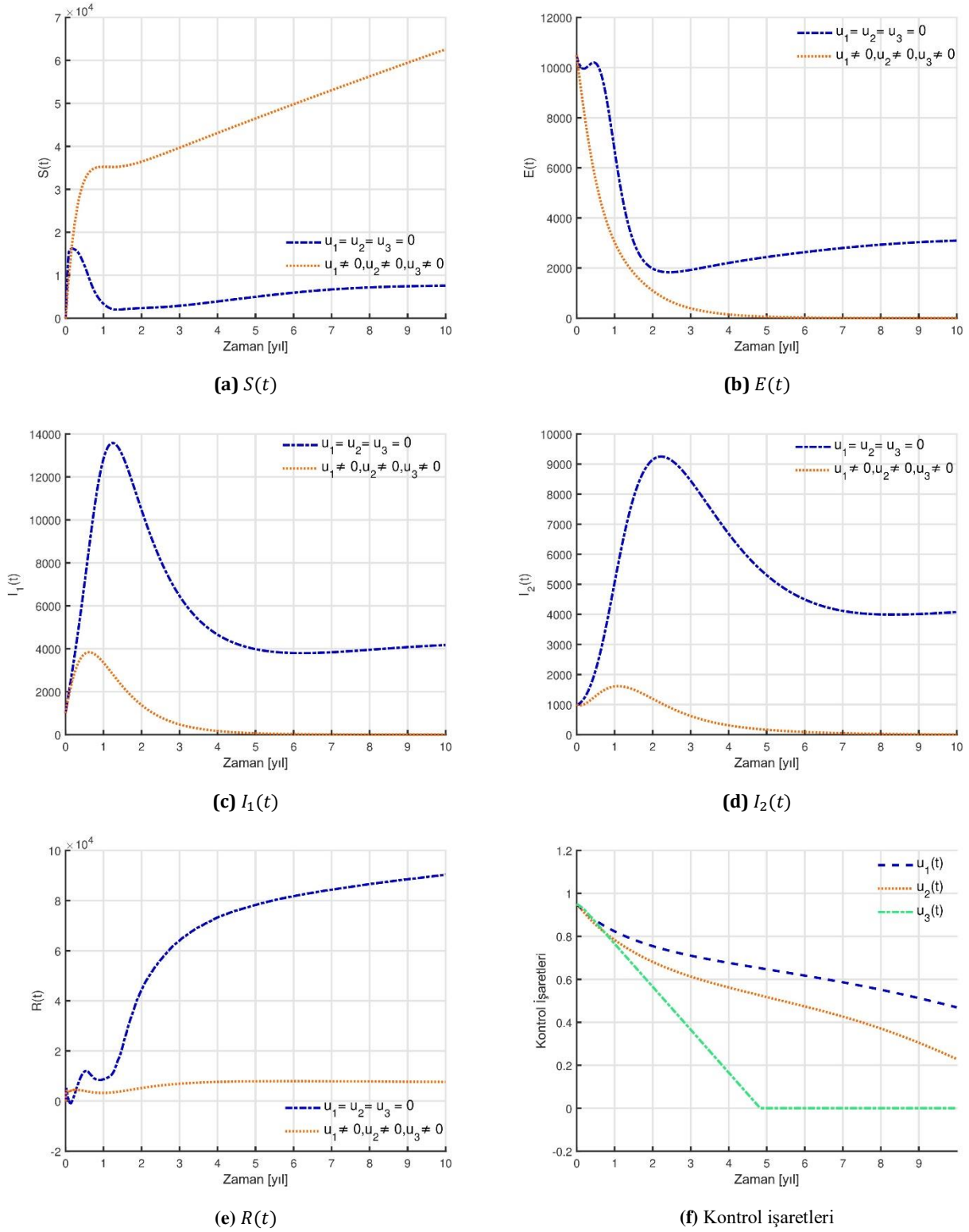
5. Nümerik Sonuçlar (Numerical Results)

Bu çalışmada uyarlamalı UKF tabanlı optimal kontrol sonuçları için kullanılan tasarım parametreleri şu şekildedir: Durum kestirimi için $\mathbf{P} = 10^{-2}\mathbf{I}_{n \times n}$, $\mathbf{Q} = 10^{-7}\mathbf{I}_{n \times n}$, $R = 10^{-2}$ ve optimal kontrol için $\mathbf{Q}_c = \mathbf{R}_c = 10^{-1}\mathbf{I}_{n \times n}$. Kontrol işaretlerinin sınırları 0 – 1 aralığında seçilmiş, değişimi ise $\Delta u_i = 10^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Eşitlik (1)'de sunulan yeni tüberküloz modelinde tanımlı w_1 ve w_2 parametreleri evden hastaneye/hastaneden eve ilerleme oranlarıdır. Daha açık bir ifadeyle; w_1 parametresi; aktif TB'si olan ve evde tedavi edilen birey ($I_1(t)$) sınıfından aktif TB'si olan ve hastanede tedavi edilen birey ($I_2(t)$) sınıfına ilerleme hızını, w_2 parametresi ise; aktif TB'si olan ve hastanede tedavi edilen birey ($I_2(t)$) sınıfından aktif TB'si olan ve evde tedavi edilen birey ($I_1(t)$) sınıfına ilerleme hızını göstermektedir. Bu çalışmada uyarlanabilir kokusuz Kalman filtre tabanlı optimal denetleyici yönteminde w_1 ve w_2 parametrelerine göre üç farklı kontrol stratejisinin ($u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$) eş-zamanlı değişimi gözlenmiştir. Bu parametreler değerleri gerçekçi bir performans karşılaştırması yapabilmek için (Yıldız and Karaoğlu 2019) çalışmasında verilen ve Tablo 1'de nümerik değerleri sunulan şekliyle kullanılmıştır. Bu parametrelerin aldığı değerlere göre elde edilen nümerik sonuçlar farklı anlamlar taşımaktadır. Şekil 1'de kontrol işaretlerinin varlığında ve kontrol işaretlerinin uygulanmadığı durumlarda $w_1 = 0.001, w_2 = 0.8$ durumunu içeren epidemiyolojik sınıflara ait dinamiklerin davranışları verilmiştir.

Hastaneden eve geçişin, evden hastaneye geçişe göre daha güçlü olduğu ve kontrol işaretlerinin TB dinamiklerine etki ettiği bu durumda $E(t), I_2(t)$ değerlerinin azaldığı görülürken, kontrol işaretleri kullanılmadığında iyileşen bireylerin ve evde tedavi edilen bulaşıcı kişilerin sayısının zaman içinde arttığı gözlemlenir. Şekil 2'de ise kontrol işaretlerinin varlığında ve kontrol işaretlerinin uygulanmadığı durumlarda $w_1 = 0.8, w_2 = 0.001$ parametrelerine ait sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 1. $w_1 = 0.001, w_2 = 0.8$ için uyarlamalı optimal kontrol sonuçları (Adaptive optimal control results for $w_1 = 0.001, w_2 = 0.8$)



Şekil 2. $w_1 = 0.8, w_2 = 0.001$ için uyarlamalı optimal kontrol sonuçları (Adaptive optimal control results for $w_1 = 0.8, w_2 = 0.001$)

Şekil 1'deki sonuçların aksine, $E(t), I_1(t), I_2(t)$ popülasyonlarının uzun vadede arttığı görülmektedir. Bu senaryoya göre, hastalığın hem $I_1(t)$ hem de $I_2(t)$ için ortadan kaldırılması, daha stratejik bir optimal kontrol müdahalesi ile olmalıdır. Kontrol işaretinin etkisi yansıdığına ise $E(t), I_1(t), I_2(t)$ popülasyonlarının hızla azaldığını gözlemlenmektedir.

Aktif tüberküloz modelindeki optimal kontrol probleminin amacı, uzun vadede duyarlı bireylerin yeni enfeksiyonlardan korunma çabasını en uygun değerde tutarak hastalığa müdahale stratejilerinin hesaplanmasını sağlamaktır. Bununla birlikte tüberküloz hastalarının evde ve hastanede yapılan tedavilerinin başarısız olmasını

önleme çabalarını en aza indirmekte istenen amaçlardandır. Şekil-1f ve Şekil-2f'de resimlendirilen uyarlamalı kontrol işaretleri kullanıldığında elde edilen Tablo 2 ve Tablo 3'deki performans sonuçlarını değerlendirildiğinde aktif tüberküloz hastalarında uzun vadede hastalığı ortadan kaldırmak için sürekli çaba göstermek yerine, kontrollerin optimal değerleri üzerinden bir tedavi stratejisi düşünülmesi önerilmektedir.

Tablo 2. Önerilen uyarlamalı optimal denetleyicinin performansı ($w_1 = 0,001, w_2 = 0,8$) (Performance of the proposed adaptive optimal controller ($w_1 = 0,001, w_2 = 0,8$))

Ölçüt (RMSE) $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (e(t))^2 dt}$	Önerilen UKKF tabanlı optimal denetleyici	Klasik optimal denetleyici (Yıldız and Karaoğlu 2019)
Kontrol işareti yok ($u_i = 0$)	6,310e+3	4,246e+5
Kontrol işareti var ($u_i \neq 0$)	4,141e+3	2,016e+5

Tablo 3. Önerilen uyarlamalı optimal denetleyicinin performansı ($w_1 = 0,8, w_2 = 0,001$) (Performance of the proposed adaptive optimal controller ($w_1 = 0,8, w_2 = 0,001$))

Ölçüt (RMSE) $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (e(t))^2 dt}$	Önerilen UKKF tabanlı optimal denetleyici	Optimal denetleyici (Yıldız and Karaoğlu 2019)
Kontrol işareti yok ($u_i = 0$)	7,576e+3	1,868e+4
Kontrol işareti var ($u_i \neq 0$)	3,622e+3	1,711e+4

6. Sonuç (Conclusion)

Sonuç olarak, bu çalışmada aktif tüberkülozlu, evde ya da hastanede tedavi edilen bireylerde ölçülemeyen tüberküloz dinamiklerini kontrol etmek için uyarlanabilir kokusuz bir Kalman filtre tabanlı optimal denetleyici tasarlanmıştır. Sayısal hesaplamalar tüberküloz dinamiklerinin stabilizasyonu için önerilen uyarlanabilir kokusuz bir Kalman filtre tabanlı optimal denetleyicinin literatürdeki klasik optimal denetleyiciye göre daha fazla tercih edilebilir olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede, hastalığa ait uzun vadeli tedavi stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlanacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Castillo-Chavez, C., and Feng, Z., 1997. To treat or not to treat: the case of tuberculosis. *Journal of mathematical biology*, 35(6):629–656.
- Cetin, M., and Beyhan, S., 2019. Adaptive stabilization of uncertain cortex dynamics under joint estimates and input constraints. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 66(4):627–631.
- Das, M., Dey, A., Sadhu, S., and Ghoshal T., 2015. Adaptive central difference filter for non-linear state estimation. *IET Science, Measurement & Technology*, 9(6):728–733.
- Earn, DJ., Brauer, F., Driessche, P., and Wu, J., 2008. *Mathematical epidemiology*. Springer.
- Gao, D., and Huang, N., 2018. Optimal control analysis of a tuberculosis model. *Applied Mathematical Modelling*, 58:47–64.
- Hajiyev, C., and Soken, H. E., 2014. Robust adaptive unscented Kalman filter for attitude estimation of pico satellites. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 28(2):107–120.
- Hethcote, H., 2000. The mathematics of infectious diseases. *SIAM review*, 42(4):599–653.
- Huo, H., and Zou, M., 2016. Modelling effects of treatment at home on tuberculosis transmission dynamics. *Applied Mathematical Modelling*, 40(21-22):9474–9484.
- Itik, M., 2016. Optimal control of nonlinear systems with input constraints using linear time varying approximations. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 21(3):400–412.
- Julier, S., and Uhlmann, J., 2004. Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3):401–422.

- Khajanchi, S., Das, D., and Kar, T., 2018. Dynamics of tuberculosis transmission with exogenous reinfections and endogenous reactivation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 497:52–71.
- Liang, X., Xu, J., and Zhang H., 2017. Optimal control and stabilization for networked control systems with packet dropout and input delay. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 64(9):1087–1091.
- Silva, C. J., and Torres, D., 2015. Optimal control of tuberculosis: A review. In *Dynamics, Games and Science*, pages 701–722.
- Yıldız, T., and Karaoğlu, E., 2019. Optimal control strategies for tuberculosis dynamics with exogenous reinfections in case of treatment at home and treatment in hospital. *Nonlinear Dynamics*, 97(4):2643–2659.
- Waalder, H., Geser, A., and Andersen, S., 1962. The use of mathematical models in the study of the epidemiology of tuberculosis. *American Journal of Public Health and the Nations Health*, 52(6):1002–1013.
- Wan, E., and Merwe, R., 2000. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. In *Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, IEEE*, pages 153–158.
- World Health Organization et al. Global tuberculosis report 2017. World Health Organization.



GRAPHENE-TUNABLE MID-INFRARED METAMATERIALS BASED ON TITANIUM NITRIDE NANORODS

Erdem ASLAN*, Ekin ASLAN

Department of Electrical and Electronics Engineering, Hatay Mustafa Kemal University, 31060, Hatay, Turkey

Keywords

*Plasmonics,
Tunable Metamaterials,
Graphene,
Nanoantenna,
Perfect Absorbers.*

Abstract

Graphene-tunable, particle-based and absorber metamaterials are presented which utilize titanium nitride as the plasmonic material. The design of the particle-based nanoantenna array is shown via geometrical parameter sweep simulations. Additionally, the origin of the resonance mode is revealed by decomposing the spectrum into the radiating contributions of multipoles and near-field-enhancement distribution maps. Moreover, the tunability of the designed metamaterial is shown by changing the chemical potential of a monolayer of graphene which is coated on top of the device. To utilize the designed device as an absorber metamaterial, a mirror layer is introduced for the elimination of the transmission through the device. With the aim of obtaining perfect absorption, the thickness values of the functional layers are optimized via parameter sweep simulations. Finally, the tunability of the absorber metamaterial is shown by utilizing a graphene monolayer on top of the nanoantennas and the tuning performance of both architectures are compared. The engineering of graphene-tunable metal-free metamaterials provides a novel strategy for the development of low-cost integrated photonic devices and plasmonic devices which are resistant to high temperatures.

TİTANYUM NİTRİT NANOÇUBUK TABANLI GRAFEN İLE AYARLANABİLİR ORTA-KIZİLÖTESİ METAMALZEMELER

Anahtar Kelimeler

*Plazmonik,
Ayarlanabilir Metamalzeme,
Grafen,
Nanoanten,
Mükemmel Soğurucu.*

Özet

Plazmonik malzeme olarak titanyum nitrit kullanan, grafen ile ayarlanabilir, parçacık ve soğurucu tabanlı metamalzemeler sunulmuştur. Parçacık tabanlı nanoantenin tasarımı, parametre değişimi benzetimleri ile sunulmuştur. Ayrıca, rezonans modlarının kökeni, çok kutuplu modların, tasarlanan yapının tayfına katkılarının belirlenmesi ve yakın alan güçlendirme dağılım haritaları ile ortaya konmuştur. Buna ek olarak, tasarlanan metamalzemenin ayarlanabilirliği, yapının üzerine kaplanmış tek katman grafenin kimyasal potansiyelinin değiştirilmesi ile gösterilmiştir. Tasarlanan cihazın soğurucu metamalzeme olarak kullanılabilmesi amacıyla, yapıdan elektromanyetik geçirgenliği elimine etmek için bir ayna katmanı eklenmiştir. Soğurmanın mükemmel olması için, fonksiyonel yapıların kalınlıkları, parametre değişimi benzetimleri ile optimize edilmiştir. Son olarak, soğurucu yapının ayarlanabilirliği, nanoantenlerin üzerine tek katmanlı grafenin kaplanması ile sağlanmıştır ve parçacık ve soğurucu tabanlı metamalzemelerin ayarlanabilirlik performansları karşılaştırılmıştır. Grafen ile ayarlanabilir, metal kullanılmayan metamalzemelerin mühendisliği, düşük maliyetli tümleşik fotonik cihazların ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı plazmonik cihazların geliştirilebilmesi için yeni bir strateji sağlamaktadır.

Alıntı / Cite

Aslan, E., Aslan, E., (2020). Graphene-Tunable Mid-Infrared Metamaterials Based on Titanium Nitride Nanorods, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(4), 1269-1277.

* İlgili yazar / Corresponding author: erdem.aslan@mku.edu.tr

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E. Aslan, 0000-0001-6829-9000	Başvuru Tarihi / Submission Date	27.10.2020
E. Aslan, 0000-0003-0933-7796	Kabul Tarihi / Accepted Date	08.12.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Introduction

Instead of changing the molecular structure and macroscopic geometrical parameters of optical components, electromagnetic metamaterial technology relies on engineering the optical response via altering the subwavelength structure for the realization of optically functional devices (RoyChoudhury et al., 2016; Wenclawiak et al., 2019). As a result, metamaterials have provided a huge degree of freedom to manipulate the electromagnetic waves (Aslan, 2020). Additionally, metamaterials pave the way to access the electromagnetic functionalities which are not observed in nature such as negative refractive index (Pendry, 2000), electromagnetic cloaking (Schurig et al., 2006), inverse Doppler effect (Chen et al., 2011) and optical magnetism (Monticone and Alù, 2014). The preliminary efforts in metamaterial research focused on the development of the devices with fixed spectral response (Shelby et al., 2001; Smith et al., 2000). However, up-to-date research areas require photonic devices with tunable optical properties for the applications such as photonic integrated circuits (Dietrich et al., 2016) and tunable plasmonic sensors (Cen et al., 2018). Hence the tunable metamaterials have attracted significant attention (Hajian et al., 2019; Jiang et al., 2018). There are many techniques to tune the resonant modes of the metamaterials including optical, thermal, mechanical, and electrical controls. Optical tunability relies on the photoconductivity of materials such as silicon (Shen et al., 2009) and gallium arsenide (Zhao et al., 2015). In a similar way, thermally tunable metamaterials exploit the properties of thermal-responsive materials such as vanadium oxide (Bang et al., 2018) and strontium titanate (X. Huang et al., 2019). Additionally, flexible (Liu et al., 2019) and micro-electromechanics metamaterials (Ren et al., 2019) are the examples of the mechanically tunable metamaterials. Electrical control depends on the change of charge carrier concentration by the applied voltage (Fang et al., 2020; Isic et al., 2019; Min et al., 2019). Graphene is one of the most promising materials to be utilized in tunable metamaterials (Zhang et al., 2020; Zou et al., 2019) which is a two-dimensional material composed of hexagonally arranged carbon atoms with an atomic layer thickness. Additionally, graphene can enable the tunability of a metamaterial by the applied external electrostatic voltages (Kim et al., 2012; Xiao et al., 2019; Ye et al., 2019; Y. Zhang et al., 2016).

Surface plasmons are propagating electron density oscillations at the conductor-dielectric interface due to the coupling of the incident light to the conduction electrons of the metal. The non-propagating type of surface plasmons are called localized surface plasmons (LSPs) which is observed on the surface of metallic subwavelength particles (Aslan et al., 2016; Cao et al., 2014). The resonant behavior of LSPs results with the subwavelength confinement of light. Noble metals are the most studied materials to design the LSP resonance (LSPR) based metamaterials however the high ohmic losses of the noble metals restrict the range of plasmonic metamaterial applications (Naik et al., 2013). In the last decade, wide variety of alternative plasmonic materials have been developed such as III-V semiconductors (Zhong et al., 2015), transparent conductive oxides and nitrides (Naik et al., 2011). One of the most promising alternative plasmonic materials is the titanium nitride (TiN) due to its metallic optical properties in visible and longer wavelengths and CMOS fabrication compatibility (Gui et al., 2016). Additionally, TiN is a refractory material hence it can sustain high temperatures which makes it suitable for high-energy-loss applications such as perfect absorbers (Li et al., 2014). Despite the advantages of alternative plasmonic materials, few previous works have focused on the tunable metamaterials which utilize graphene and alternative plasmonic materials (Salemizadeh et al., 2019).

In this study, the design and numerical characterization of tunable particle-based and absorber metamaterials are presented which utilize TiN nanoparticles as plasmonic structures and a graphene layer in order to tune the plasmonic resonances dynamically. First, the particle-based metamaterial is analyzed by revealing the dependence of its reflection spectra to its geometrical parameters. Additionally, the physical origin of the resonant mode is investigated through multipole expansion and field enhancement maps. In order to tune the plasmonic resonance dynamically, the metamaterial is covered with a monolayer of graphene and the tunability is investigated through the dependence of spectral shift on the electrochemical potential of graphene layer. Moreover, the optical properties and the tunability of the absorber metamaterial is investigated which is derived from the particle-based device by adding a mirror layer. Due to their metal-free design and spectral tunability, the proposed designs can be utilized in tunable optical sensors and integrated photonic devices.

2. Design of the Particle Based Metamaterial

With the aim of designing a metal free and tunable metamaterial, TiN is utilized as the plasmonic material. The designed metamaterial has two significant advantages which are the noble metal-free design and the simple

geometry. The former advantage reduces the ohmic losses which have the highest value at the resonant wavelength and the latter advantage is due to the rod-shape which is an elementary antenna geometry that allows the realization of the metamaterial via low-cost mass-production methods such as nano-stencil fabrication. Fig. 1(a) shows the schematic illustration and the geometrical parameters of the unitcell for the designed metamaterial. The unitcell consists of a 300 nm thick TiN rod shaped nanoantenna as a resonator and a 200 nm thick sapphire (Al_2O_3) substrate. The main geometrical parameters of the nanoantenna are length, L and the width, W . P_x and P_y are the periodicities of the unitcell along the x and y directions, respectively. The dispersion data of TiN is taken from the literature (Bagheri et al., 2015) and the data in the material-database of the Lumerical FDTD Solutions software is used for the sapphire which is taken from the reference (Palik, 1997). During the simulations, the nanoantenna is illuminated from the top-side by a normally-incident plane-wave and the periodic boundary conditions are used along the x and y directions. For the boundaries along the z -axis, perfect match layer is utilized in order to eliminate the reflections. Fig. 1(b) shows the reflectance spectrum of the metamaterial under x -polarized mid-infrared light for several values of L . Light incident on the rod nanoantenna, causes displacement of the conduction band electrons with respect to the central point of the particle which gives rise to a restoring force originating from Coulombic attraction. The electrons that have the oscillation phase with a $\pi/2$ lag according to the electric field of incident light, contributes to the LSPR (Petryayeva and Krull, 2011). The size of the particle along the electric field of the light specify the resonance wavelength hence a redshift of the resonant mode is observed in Fig. 1(b) for the increasing value of the L .

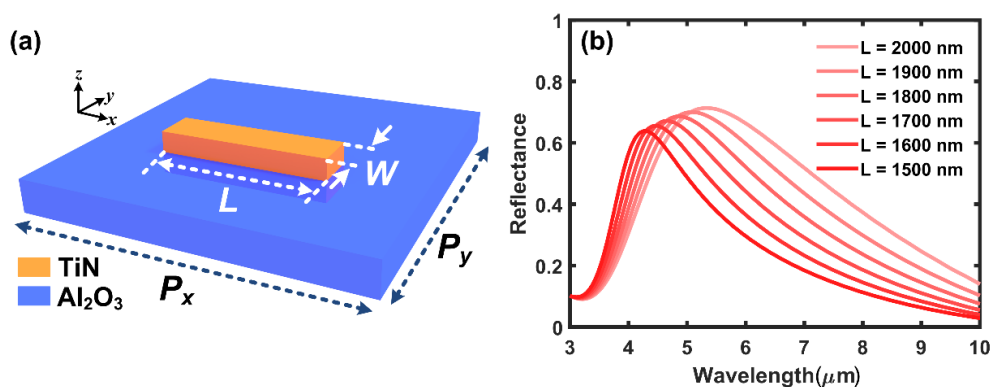


Figure 1. (a) Schematic illustration of the unitcell of the designed particle-based metamaterial. L is the length and W is the width of the nanoantenna. P_x and P_y are the periodicities of the unitcell along the x - and y -axes, respectively. (b) Reflectance spectrum of the metamaterial under x -polarized light for various L values while other parameters are kept constant as $W = 500$ nm, $P_x = P_y = 2500$ nm.

In order to reveal the physical origin of the resonance mode, the reflectance spectrum for the case of $L = 1500$ nm is decomposed into the radiating contributions of multipoles by using the localized distribution of the volume current density in the rod antenna (Dong et al., 2013; Y.-W. Huang et al., 2012). Fig. 2(a) shows the scattering power of each moment for the case of $L = 1500$ nm. In this figure P is the power of dipolar electric moment, M is the dipolar magnetic moment, Tor is the toroidal mode, Q_e is the quadrupolar electric moment and Q_m is the quadrupolar magnetic moment. It is seen in Fig. 2(a) that the resonance mode has a dipolar electric characteristic and this situation is verified by the electric and magnetic field enhancement distribution maps which are shown for the top surface of the nanoantenna in Fig. 2(b) and (c), respectively. Fig 2(b) shows that the electric field enhancement has its maximum value at the corners of the rod antenna which also shows that the locations of highest charge accumulations. Due to the dipolar electric characteristic, a resonant current density occurs which has the maximum value at the edges of the rod antenna and causes a high magnetic-field-enhancement as shown in Fig. 2(c). This situation explains the condition that the magnetic dipole mode is the second dominant mode at the resonant wavelength which is the consequence of the current density.

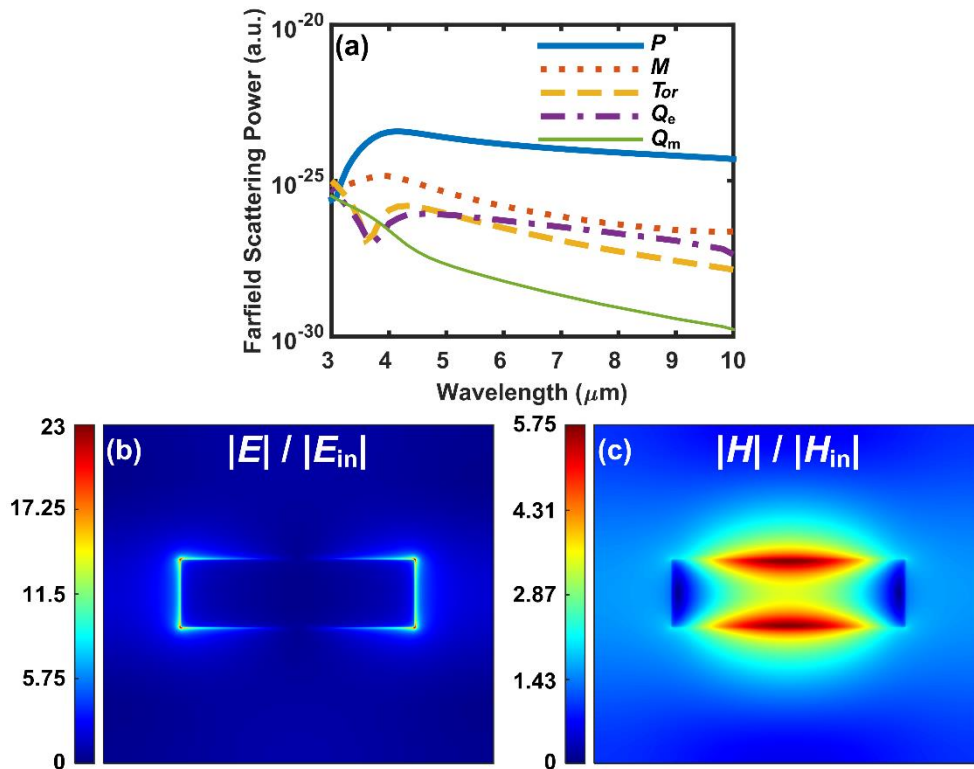


Figure 2. (a) Scattering power of the electromagnetic modes of the reflectance spectra for the case of $L = 1500$ nm and $W = 500$ nm. (b) Electric field enhancement ($|E|/|E_{in}|$) and (c) magnetic field enhancement ($|H|/|H_{in}|$) at the top surface of the nanoantenna for the resonance wavelength of 4272 nm.

3. Tunability of the Particle Based Metamaterial

It is convenient to model the electrical properties of monolayer graphene as surface conductivity σ which is defined by the intraband σ_{intra} and interband σ_{inter} contributions (Andryieuski and Lavrinenko, 2013; Jin et al., 2019).

$$\sigma(\omega) = \sigma_{intra}(\omega) + \sigma_{inter}(\omega) \quad (1)$$

$$\sigma_{intra}(\omega) = \frac{2\kappa_b T e^2}{\pi \hbar^2} \ln \left(2 \cosh \frac{E_f}{2\kappa_b T} \right) \frac{i}{(\omega + i\Gamma)} \quad (2)$$

$$\sigma_{inter}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[H(\omega/2) + i \frac{4\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{H(\Omega) - H(\omega/2)}{\omega^2 - 4\Omega^2} d\Omega \right] \quad (3)$$

$$H(\Omega) = \frac{\sinh(\hbar\Omega/\kappa_b T)}{\left[\cosh(\hbar\Omega/\kappa_b T) + \cosh(E_f/\kappa_b T) \right]} \quad (4)$$

In the equations, T is the temperature, E_f is the electrochemical potential, ω is the frequency of the incident light and Γ is the inverse of relaxation time. In the THz and the far-infrared region, the intraband contribution is dominant while in the near-infrared and visible frequencies the interband contribution becomes significantly higher (Wang et al., 2019). Monolayer graphene possesses a weak interaction with light hence it has a high optical transparency. The enhanced electromagnetic fields that surrounds the vicinity of plasmonic subwavelength particles can play an intermediate role for the amplification of this interaction via confining the energy of incident light to the graphene layer. Additionally, plasmonic resonances are highly sensitive to the electrical and optical properties of the surrounding environment that an incremental change of the refractive index results with a redshift of the resonant wavelength. Hence the existence of the graphene layer at the electromagnetic hotspot of the nanoantennas can shift the resonance frequency (Low and Avouris, 2014; Nan et al., 2018). Moreover, the E_f value can be controlled by applying an external voltage to the graphene layer which provides the alteration of the surface conductivity of graphene. By utilizing the tunability of the surface conductivity of the graphene, the frequency of the plasmonic resonance of the TiN nanorod antennas can be tuned by changing the applied external voltage.

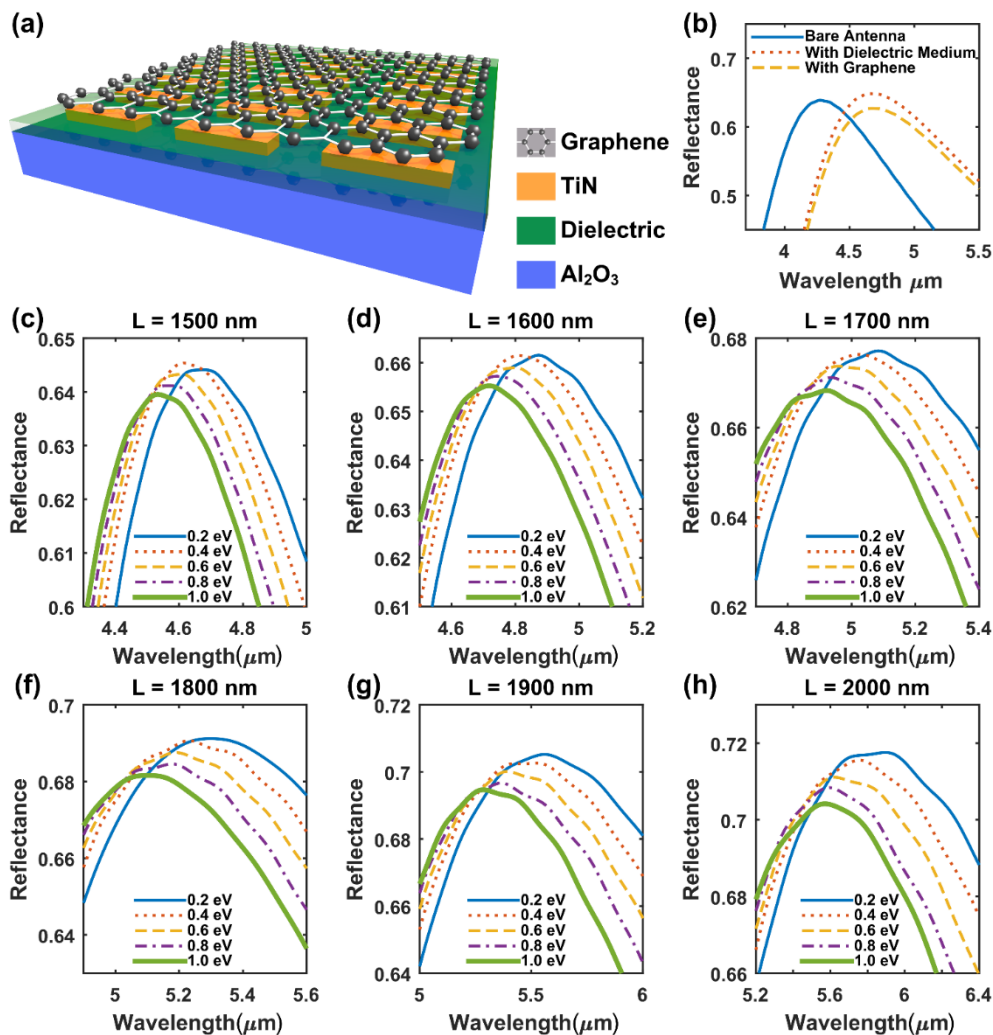


Figure 3. (a) Schematic illustration of the nanoantenna with monolayer graphene on top. (b) Reflectance spectra of the bare antenna, antenna with dielectric medium and with graphene on top. Spectra that shows the graphene tuning of the resonance mode for (c) $L = 1500$ nm, (d) $L = 1600$ nm, (e) $L = 1700$ nm, (f) $L = 1800$ nm, (g) $L = 1900$ nm, (h) $L = 2000$ nm.

In order to integrate the graphene layer on top of the designed nanoantenna array, a dielectric layer is utilized that surrounds the nanoantennas and provides a flat surface for coating the graphene layer. The refractive index of the dielectric layer is taken as 1.3 and the thickness of this layer has the same thickness with the TiN nanoantennas as shown in Fig. 3(a). Fig. 3(b) shows the reflectance spectra for the bare nanoantenna array (blue solid line), nanoantenna with dielectric layer (red dotted line) and the antenna array with graphene layer on top (yellow dashed line). Due to the greater refractive index of the dielectric medium, the spectral location of the resonance mode for the dielectric coated antenna array is red-shifted with respect to the resonance wavelength of the bare antenna array. Additionally, it is seen in Fig. 3(b) that the effect of the graphene layer is a slight decrease of the reflectance amplitude which is the result of the absorption of the graphene layer. In order to reveal the effect of the electrochemical potential of the graphene on the plasmonic resonance of TiN rod antennas, simulations for the TiN rod antenna arrays for various L values are ran while sweeping the electrochemical potential of the graphene layer from 0.2 eV to 1 eV. The results of the simulations are presented in Fig. 3 (c)-(h) which also shows the tunability of the dipolar electric resonances.

4. Design of the Absorber Metamaterial

Due to the development in the nanofabrication methods, a wide variety of metamaterial concepts have been developed (Urbas et al., 2016). One of the most remarkable type of these metamaterials are the plasmonic perfect absorbers which have gained great interest due to their near-unity absorption capability and potential applications including the selective thermal emitters (Hossain et al., 2015), spectroscopy (Aslan et al., 2019) and energy conversion (Xie et al., 2014). With the aim of designing a tunable absorber metamaterial, the structure is modified as shown in Fig. 1(a) by adding a TiN mirror layer under the sapphire layer. The schematic illustration of the absorber metamaterial is shown in Fig 4(a). In this configuration the main principle of absorption is minimizing the reflectance by impedance matching through the nanoantennas and the elimination of transmission

by the TiN film which electromagnetically couples to the top TiN nanoantennas. This coupling is supported by the sapphire spacer layer. In our simulations, the structure is top illuminated by a x -polarized normally-incident plane wave and the obtained spectra is shown in Fig. 4(b) for $L = 1500$ nm, $W = 500$ nm, $P_x = P_y = 2500$ nm and the thickness of antennas and the spacer layer are 300 nm and 500 nm, respectively. It is seen that the transmission is zero hence the absorbance (Abs) can be calculated from the reflectance (Ref) data as $Abs = 1 - Ref$. For the designed structure, the incident light is coupled to the top antenna which results with dipolar charge distribution and this distribution is mirrored by the bottom TiN film via electromagnetic coupling. The ohmic losses arising from the conduction current is the main dissipation mechanism for the energy of incident light.

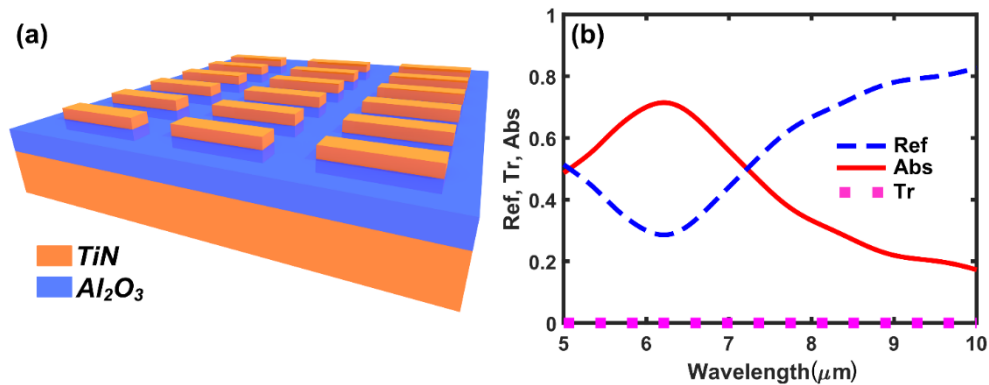


Figure 4. (a) Schematic illustration of the unitcell of the absorber metamaterial. (b) Reflectance, absorbance, and transmittance spectrum of the absorber under x -polarized light for $L = 1500$ nm, $W = 500$ nm, $P_x = P_y = 2500$ nm.

To maximize the absorption performance of the metamaterial, the thickness values of the antenna ($t_{Antenna}$) and the spacer layer (t_{Spacer}) must be optimized which are schematically illustrated in Fig 5(a). For this purpose, thickness sweep simulation results are shown in Fig. 5(b). The thickness values of the nanoantenna and the spacer layer are changed from 50 nm up to 500 nm with a step of 50 nm while other geometrical parameters are kept constant as $L = 1500$ nm, $W = 500$ nm and $P_x = P_y = 2500$ nm. It is observed in Fig. 5(b) that there is a region at which near-perfect absorption can be obtained and, in this region, $t_{Antenna}$ and t_{Spacer} is inversely proportional. Hence, it is preferred to keep the antenna thinner than the spacer layer and the preferred thickness values are $t_{Antenna} = 100$ nm and $t_{Spacer} = 300$ nm. Fig 5(c) shows the dependence of the absorption spectrum on the L parameter for the optimized thickness parameters while other geometrical parameters are fixed. It is observed that increasing the value of L parameter results with a red-shift of the resonant mode while maintaining the near-perfect-absorption at the resonance wavelength.

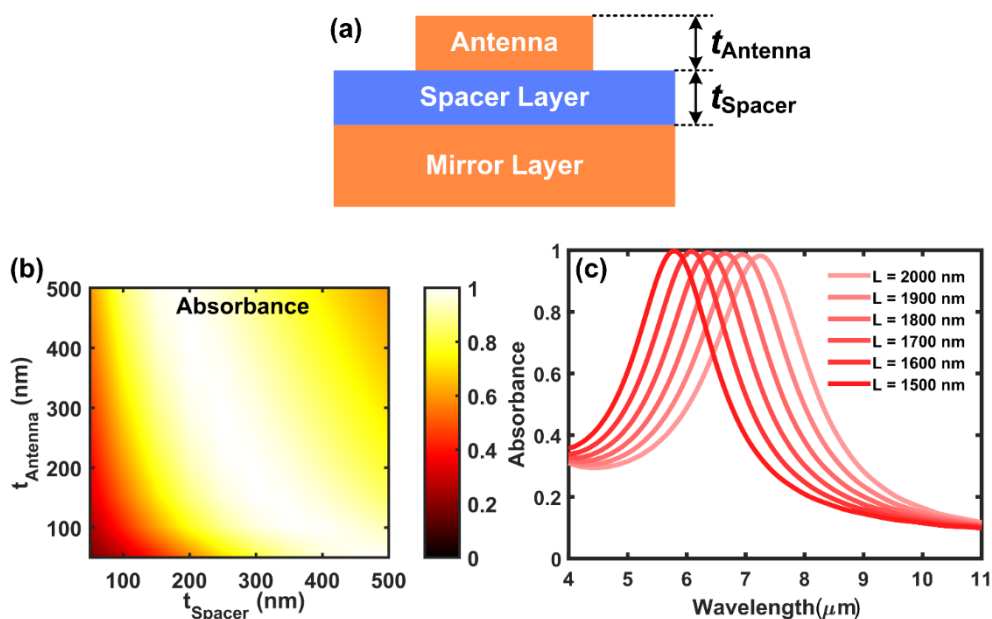


Figure 5. (a) Schematic illustration of the cross-sectional view of the absorber metamaterial which shows the layer thickness parameters. (b) Dependence of the absorbance on the thickness of the antenna and the spacer layer. (c) Absorbance results of L -sweep with the optimized thickness values.

5. Tunability of the Absorber Metamaterial

In order to make the absorber tunable, a dielectric layer is utilized that has the same thickness of the TiN antennas to support the top graphene layer as shown in Fig. 6(a) which is the same strategy for the particle-based device. During the simulations, the chemical potential of the graphene layer is swept from 0.2 eV to 1 eV with a step of 0.2 eV for various values of L and the results are presented in Fig. 6(b)-(g). For all the situations in Fig. 6(b)-(g), a blue-shift is observed for the increasing value of the electrochemical potential of the graphene layer. This situation can be explained by the increased number of the free electrons and the transfer of these electrons to the nanoantennas where they contribute to the LSP oscillations (Nan et al., 2018). In order to quantify and compare the tuning performance of the particle-based and absorber metamaterials, the amount of resonance-wavelength shift is calculated which is defined as the difference between the resonance wavelengths for the cases of $E_f = 0.2$ eV and $E_f = 1$ eV. The results are summarized in Table 1 for various values of the L parameter and it is observed that the resonance-wavelength-shift increases for the increasing value of the L parameter for both device architectures. However, the resonance-wavelength-shift is much higher for the absorber device than the particle-based device. This situation can be attributed to the higher field-enhancement of the absorber device which is calculated as 37 at its maximum. The highest resonance-wavelength-shift is obtained as 570 nm for the absorber device with a L value of 2000 nm.

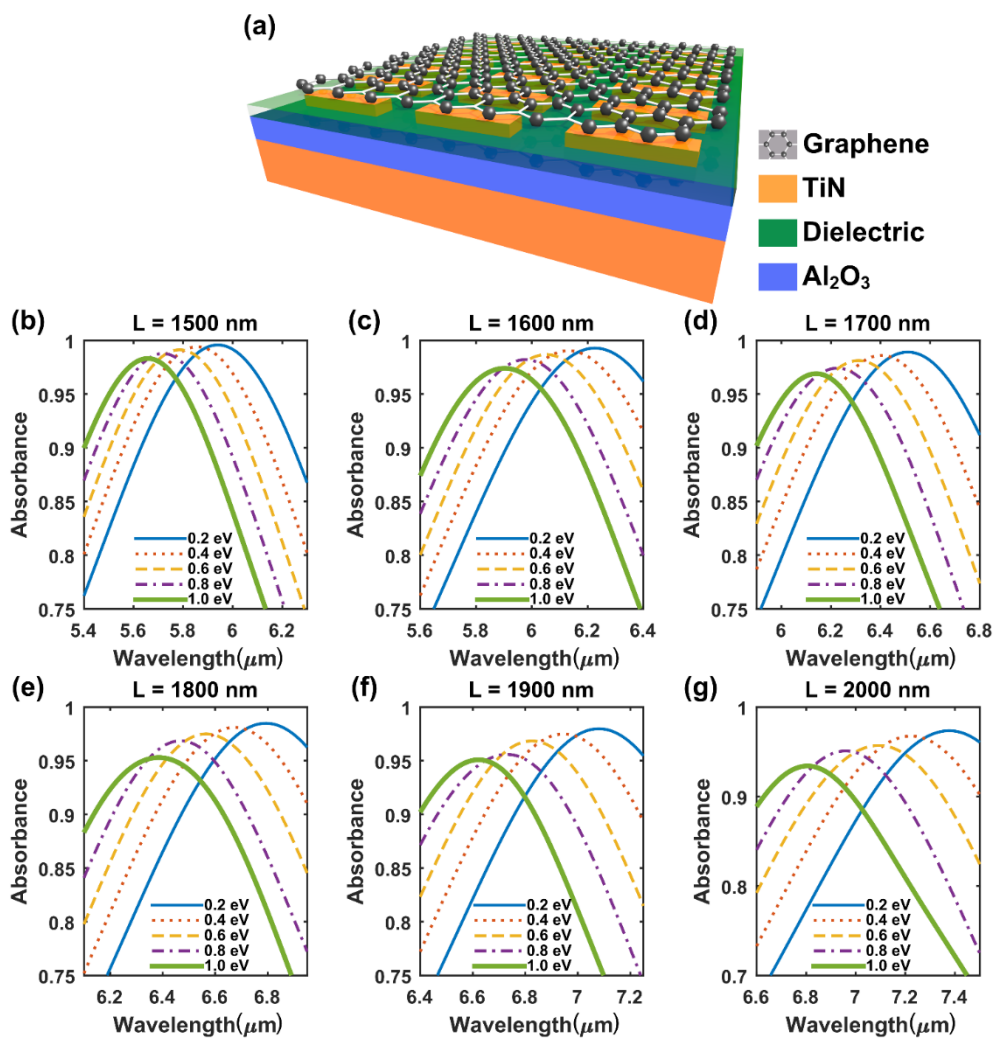


Figure 6. (a) Schematic illustration of the absorber with monolayer graphene on top. Spectra that shows the graphene tuning of the absorbance mode for (b) $L = 1500$ nm, (c) $L = 1600$ nm, (d) $L = 1700$ nm, (e) $L = 1800$ nm, (f) $L = 1900$ nm, (g) $L = 2000$ nm.

Table 1. Amount of resonance-wavelength-shift while the electrochemical potential of graphene is increased from 0.2 eV to 1 eV for the particle-based ($\Delta\lambda_{particle}$) and absorber ($\Delta\lambda_{absorber}$) metamaterials which have various values of L parameter.

	L value					
	1500 nm	1600 nm	1700 nm	1800 nm	1900 nm	2000 nm
$\Delta\lambda_{particle}$	160 nm	150 nm	160 nm	200 nm	280 nm	330 nm
$\Delta\lambda_{absorber}$	290 nm	330 nm	370 nm	410 nm	450 nm	570 nm

6. Conclusions

The design and numerical demonstration of graphene-tunable TiN-based metamaterials have been presented. The designed metamaterials were based on the particle and absorber architectures. The design of the particle-based nanoantenna array has been demonstrated via geometrical parameter sweep simulations. Additionally, the origin of the resonance mode has been revealed by decomposing the spectrum into the radiating contributions of multipoles and near-field-enhancement distribution maps. Moreover, the tunability of the designed metamaterial has been shown by changing the chemical potential of a monolayer of graphene which was coated on top of the device. To utilize the designed device as an absorber metamaterial, a mirror layer has been introduced for the elimination of the transmission through the device. With the aim of obtaining perfect absorption, the thicknesses of the TiN nanoantennas and the sapphire spacer layer have been optimized via parameter sweep simulations. Finally, the tunability of the absorber metamaterial has been shown by utilizing a graphene monolayer on top of the TiN nanoantennas and compared the amount of resonance-wavelength-shift values of both architectures. The engineering of graphene-tunable TiN-based metamaterials provides a novel strategy for the development of low-cost integrated photonic devices and plasmonic devices which are resistant to high temperatures.

Acknowledgement

The work described in this paper is supported by Scientific Research Projects Coordination Center of Hatay Mustafa Kemal University (Project ID: 19.M.016).

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Andryieuski, A., Lavrinenko, A. V., 2013. Graphene Metamaterials Based Tunable Terahertz Absorber: Effective Surface Conductivity Approach. *Optics Express*, 21(7), 9144.
- Aslan, E., 2020. Conformal Talbot-Effect-Focusing Performance of Nested Gallium-Doped Zinc Oxide Nanorings at Communication Wavelength. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 42, 100839.
- Aslan, E., Aslan, E., Wang, R., Hong, M. K., Erramilli, S., Turkmen, M., Saracoglu, O. G., Dal Negro, L., 2016. Multispectral Cesaro-Type Fractal Plasmonic Nanoantennas. *ACS Photonics*, 3(11), 2102–2111.
- Aslan, E., Aslan, E., Saracoglu, O. G., Turkmen, M., 2019. An Effective Triple-Band Enhanced-Infrared-Absorption Detection by Honeycomb-Shaped Metamaterial-Plasmonic Absorber. *Sensors and Actuators A: Physical*, 288, 149–155.
- Bagheri, S., Zgrabik, C. M., Gissibl, T., Tittel, A., Sterl, F., Walter, R., De Zuani, S., Berrier, A., Stauden, T., Richter, G., Hu, E. L., Giessen, H., 2015. Large-Area Fabrication of TiN Nanoantenna Arrays for Refractory Plasmonics in the Mid-Infrared by Femtosecond Direct Laser Writing and Interference Lithography [Invited]. *Optical Materials Express*, 5(11), 2625–2633.
- Bang, S., Kim, J., Yoon, G., Tanaka, T., Rho, J., 2018. Recent Advances in Tunable and Reconfigurable Metamaterials. *Micromachines*, 9(11), 560.
- Cao, J., Sun, T., Grattan, K. T. V., 2014. Gold Nanorod-Based Localized Surface Plasmon Resonance Biosensors: A Review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 195, 332–351.
- Cen, C., Lin, H., Huang, J., Liang, C., Chen, X., Tang, Y., Yi, Z., Ye, X., Liu, J., Yi, Y., Xiao, S., 2018. A Tunable Plasmonic Refractive Index Sensor with Nanoring-Strip Graphene Arrays. *Sensors*, 18(12), 4489.
- Chen, J., Wang, Y., Jia, B., Geng, T., Li, X., Feng, L., Qian, W., Liang, B., Zhang, X., Gu, M., Zhuang, S., 2011. Observation of the Inverse Doppler Effect in Negative-Index Materials at Optical Frequencies. *Nature Photonics*, 5, 239–242.
- Dietrich, C. P., Fiore, A., Thompson, M. G., Kamp, M., Höfling, S., 2016. GaAs Integrated Quantum Photonics: Towards Compact and Multi-Functional Quantum Photonic Integrated Circuits. *Laser and Photonics Reviews*, 10(6), 870–894.
- Dong, Z. G., Zhu, J., Yin, X., Li, J., Lu, C., Zhang, X., 2013. All-Optical Hall Effect by the Dynamic Toroidal Moment in A Cavity-Based Metamaterial. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 87(24), 245429.
- Fang, J., Huang, J., Gou, Y., Shang, Y., 2020. Research on Broadband Tunable Metamaterial Absorber Based on PIN Diode. *Optik*, 200, 163171.
- Gui, L., Bagheri, S., Strohfeldt, N., Hentschel, M., Zgrabik, C. M., Metzger, B., Linnenbank, H., Hu, E. L., Giessen, H., 2016. Nonlinear Refractory Plasmonics with Titanium Nitride Nanoantennas. *Nano Letters*, 16(9), 5708–5713.
- Hajian, H., Ghobadi, A., Butun, B., Ozbay, E., 2019. Active Metamaterial Nearly Perfect Light Absorbers: A Review [Invited]. *Journal of the Optical Society of America B*, 36(8), F131–F143.
- Hossain, M. M., Jia, B., Gu, M., 2015. A Metamaterial Emitter for Highly Efficient Radiative Cooling. *Advanced Optical Materials*, 3(8), 1047–1051.
- Huang, X., He, W., Yang, F., Ran, J., Yang, Q., Xie, S., 2019. Thermally Tunable Metamaterial Absorber Based on Strontium Titanate in the Terahertz Regime. *Optical Materials Express*, 9(3), 1377.
- Huang, Y.-W., Chen, W. T., Wu, P. C., Fedotov, V., Savinov, V., Ho, Y. Z., Chau, Y.-F., Zheludev, N. I., Tsai, D. P., 2012. Design of Plasmonic Toroidal Metamaterials at Optical Frequencies. *Optics Express*, 20(2), 1760–1768.
- Isic, G., Sinatkas, G., Zografopoulos, D. C., Vasic, B., Ferraro, A., Beccherelli, R., Kriezis, E. E., Belic, M., 2019. Electrically Tunable Metal-Semiconductor-Metal Terahertz Metasurface Modulators. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(3), 8500108.

- Jiang, N., Zhuo, X., Wang, J., 2018. Active Plasmonics: Principles, Structures, and Applications. *Chemical Reviews*, 118(6), 3054–3099.
- Jin, X., Wang, F., Huang, S., Xie, Z., Li, L., Han, X., Chen, H., Zhou, H., 2019. Coherent Perfect Absorber with Independently Tunable Frequency Based on Multilayer Graphene. *Optics Communications*, 446, 44–50.
- Kim, J., Son, H., Cho, D. J., Geng, B., Regan, W., Shi, S., Kim, K., Zettl, A., Shen, Y.R., Wang, F., 2012. Electrical Control of Optical Plasmon Resonance with Graphene. *Nano Letters*, 12(11), 5598–5602.
- Li, W., Guler, U., Kinsey, N., Naik, G. V., Boltasseva, A., Guan, J., Shalaev, V. M., Kildishev, A. V., 2014. Refractory Plasmonics with Titanium Nitride: Broadband Metamaterial Absorber. *Advanced Materials*, 26(47), 7959–7965.
- Liu, C., Cai, J., Li, X., Zhang, W., Zhang, D., 2019. Flexible and Tunable Electromagnetic Meta-Atom Based on Silver Nanowire Networks. *Materials and Design*, 181, 107982.
- Low, T., Avouris, P., 2014. Graphene Plasmonics for Terahertz to Mid-Infrared Applications. *ACS Nano*, 8(2), 1086–1101.
- Min, L., Wang, W., Huang, L., Ling, Y., Liu, T., Liu, J., Luo, C., Zeng, Q., 2019. Direct-Tuning Methods for Semiconductor Metamaterials. *Scientific Reports*, 9, 17622.
- Monticone, F., Alù, A., 2014. The Quest for Optical Magnetism: From Split-Ring Resonators to Plasmonic Nanoparticles and Nanoclusters. *Journal of Materials Chemistry C*, 2, 9059–9072.
- Naik, G. V., Kim, J., Boltasseva, A., 2011. Oxides and Nitrides as Alternative Plasmonic Materials in the Optical Range [Invited]. *Optical Materials Express*, 1(6), 1090–1099.
- Naik, G. V., Shalaev, V. M., Boltasseva, A., 2013. Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver. *Advanced Materials*, 25(24), 3264–3294.
- Nan, H., Chen, Z., Jiang, J., Li, J., Zhao, W., Ni, Z., Gu, X., Xiao, S., 2018. The Effect of Graphene on Surface Plasmon Resonance of Metal Nanoparticles. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(38), 25078–25084.
- Palik, E. D., 1997. *Handbook of Optical Constants of Solids*. Handbook of Optical Constants of Solids (Vol. I–III), College Park, Maryland, Academic Press.
- Pendry, J. B., 2000. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Physical Review Letters*, 85(18), 3966–3969.
- Petryayeva, E., Krull, U. J., 2011. Localized Surface Plasmon Resonance: Nanostructures, Bioassays and Biosensing-A Review. *Analytica Chimica Acta*, 706(1), 8–24.
- Ren, Z., Chang, Y., Ma, Y., Shih, K., Dong, B., Lee, C., 2019. Leveraging of MEMS Technologies for Optical Metamaterials Applications. *Advanced Optical Materials*, 1900653.
- RoyChoudhury, S., Rawat, V., Jalal, A. H., Kale, S. N., Bhansali, S., 2016. Recent Advances in Metamaterial Split-Ring-Resonator Circuits as Biosensors and Therapeutic Agents. *Biosensors and Bioelectronics*, 86, 595–608.
- Salemizadeh, M., Mahani, F. F., Mokhtari, A., 2019. Tunable Mid-Infrared Graphene-Titanium Nitride Plasmonic Absorber for Chemical Sensing Applications. *Journal of the Optical Society of America B*, 36(10), 2863–2870.
- Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., Smith, D. R., 2006. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science*, 314(5801), 977–980.
- Shelby, R. A., Smith, D. R., Schultz, S., 2001. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, 292(5514), 77–79.
- Shen, N.-H., Kafesaki, M., Koschny, T., Zhang, L., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., 2009. Broadband Blueshift Tunable Metamaterials and Dual-Band Switches. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 79(16), 161102.
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., Schultz, S., 2000. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184–4187.
- Urbas, A. M. et al., 2016. Roadmap on Optical Metamaterials. *Journal of Optics*, 18(9), 093005.
- Wang, R., Ren, X.-G., Yan, Z., Jiang, L. J., Sha, W. E. I., Shan, G.-C., 2019. Graphene Based Functional Devices: A Short Review. *Frontiers of Physics*, 14(1), 13603.
- Wenclawiak, M., Kainz, M. A., Unterrainer, K., Darmo, J., 2019. Dielectric Control of Localized Plasmons in Terahertz Metamaterials. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 37, 100734.
- Xiao, D., Liu, Q., Lei, L., Sun, Y., Ouyang, Z., Tao, K., 2019. Coupled Resonance Enhanced Modulation for a Graphene-Loaded Metamaterial Absorber. *Nanoscale Research Letters*, 14, 32.
- Xie, Y., Fan, X., Wilson, J. D., Simons, R. N., Chen, Y., Xiao, J. Q., 2014. A Universal Electromagnetic Energy Conversion Adapter Based on a Metamaterial Absorber. *Scientific Reports*, 4(1), 6301.
- Ye, L., Zeng, F., Zhang, Y., Liu, Q. H., 2019. Composite Graphene-Metal Microstructures for Enhanced Multiband Absorption Covering the Entire Terahertz Range. *Carbon*, 148, 317–325.
- Zhang, J., Wei, X., Rukhlenko, I. D., Chen, H.-T., Zhu, W., 2020. Electrically Tunable Metasurface with Independent Frequency and Amplitude Modulations. *ACS Photonics*, 7(1), 265–271.
- Zhang, Y., Li, T., Chen, Q., Zhang, H., O'Hara, J. F., Abele, E., Taylor, J., Chen, H.T., Azad, A. K., 2016. Independently Tunable Dual-Band Perfect Absorber Based on Graphene at Mid-Infrared Frequencies. *Scientific Reports*, 5, 18463.
- Zhao, X., Fan, K., Zhang, J., Seren, H. R., Metcalfe, G. D., Wraback, M., Averitt, R.D., Zhang, X., 2015. Optically Tunable Metamaterial Perfect Absorber on Highly Flexible Substrate. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 231, 74–80.
- Zhong, Y., Malagari, S. D., Hamilton, T., Wasserman, D., 2015. Review of Mid-Infrared Plasmonic Materials. *Journal of Nanophotonics*, 9(1), 093791.
- Zou, Y., Cao, J., Gong, X., Qian, R., An, Z., 2019. Ultrathin and Electrically Tunable Metamaterial with Nearly Perfect Absorption in Mid-Infrared. *Applied Sciences*, 9(16), 3358.



MADENCİLİKTE ATIKSU YÖNETİMİ VE KATI/SIVI AYRIMI

Savaş ÖZÜN*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Atıksu Yönetimi,
Katı/Sıvı Ayrımı,
Koagülasyon-Flokülasyon,
Merkezkaç Kuvveti,
Filtrasyon.

Öz

Üçte ikisi sularla çevrili olan Dünya'nın su rezervlerinin %3'ünden daha az miktarını tatlı su kaynaklarının oluşturduğu bilinmektedir. Tatlı su kaynakların her geçen gün azalması, su kullanan endüstrileri, oluşturdukları atıksulardan elde edilen temiz suyu tekrar kullanarak faaliyetlerini sürdürmeye yöneltmektedir. Ülkemizdeki en büyük sanayi kollarından birisi olan madencilik sektörünün de hemen hemen her aşamasında su kullanılmaktadır. Çoğunlukla katı mineral taneleri ve sudan oluşan atıksuyun tesislerde tekrar kullanılabilmesi için içermiş olduğu katı mineral tanelerinden hızlı ve etkin bir şekilde kısmen/tamamen arındırılması gerekmektedir. Gerçekleştirilen katı/sıvı ayrımı ile sağlanan temiz suyun tesise tekrar beslenebilmesi ile madencilik faaliyetlerinin sektöre uğramadan devam etmesi sağlanmaktadır. Ayrıca; çeşitli yöntemler uygulanarak atıksudan temiz su kazanımı ile gerek tesisler için gerekli ilave su ihtiyacı azalmakta, gerekse doğada atıksu kaynaklı muhtemel kirliliğin önüne geçilebilmektedir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında; madencilik faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan atık su yönetimi ve katı/sıvı ayırma yöntemlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

WASTEWATER MANAGEMENT AND SOLID/LIQUID SEPARATION IN MINING

Keywords

Wastewater Management,
Solid/Liquid Separation,
Coagulation-Flocculation,
Centrifugal Force,
Filtration.

Abstract

It is known that only less than 3% of the water reserves of the world, two thirds of which are surrounded by water, are composed of fresh water resources. Fresh water resources are decreasing day by day, this directs the industries that use water to continue their activities by reusing the treated clean water effectively obtained from the wastewater they generate. Water is used in almost every stage of the mining sector, which is one of the largest industrial branches in Turkey. In order to be reused in the processes, the wastewater, which is mostly composed of solid mineral particles and water, must be partially/completely purified from the solid mineral particles it contains in a fast and effective manner. Thus, mining operations continue without interruption by feeding the clean water provided by the solid/liquid separation back into the facility. Also, with the treatment of wastewater through applying various methods and then reusing the cleaned water, the need for additional water required for facilities is reduced and the possible pollution caused by wastewater in nature can be prevented. In this context, within the scope of this study; it is aimed to contribute to better understanding of the wastewater management and solid/liquid separation methods commonly used in mining applications.

Alıntı / Cite

Özün, S., (2020). Madencilikte Atıksu Yönetimi ve Katı/Sıvı Ayrımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1278-1289.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Özün, 0000-0001-9475-1822

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.11.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.12.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	03.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: savasozun@sdu.edu.tr, +90-246-211-1318

1. Giriş (Introduction)

Madencilik enerji/ham madde ihtiyacının karşılanması, ulusal ekonomiye olan katkısı, istihdam değerleri vb. birçok nedene bağlı olarak ülkemizin dördüncü büyük sanayi kolunu oluşturmaktadır (AB Türkiye Delegasyonu, 2018). Bulunduğu yerde gerçekleştirilmesi zorunlu ve yer seçme alternatifi olmayan madencilik faaliyetleri; dünya nüfusundaki artış ve buna bağlı olarak mineral kaynaklarına olan taleple birlikte önemli oranlarda artış göstermektedir. Ancak bu artış çevresel duyarlılık ve kaygıları da beraberinde getirmektedir (Aznar-Sánchez vd. 2018).

Maden arama, çıkarma, taşınma ve cevher hazırlama/zenginleştirme vb. işlemler neticesinde yönetilmesi gerekli katı, sıvı ve bunların karışımından oluşan çok miktarda atık üretilir. Bu atıkların türü ve toplam atık içindeki payı büyük ölçüde ülkelerin doğal kaynak rezervlerine, mineralin ekonomik değerine ve piyasa talebine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle madencilik kaynaklı atık miktarları ihmal edilebilir değerlerden baskın oranlara kadar değişebilmektedir (Szczeńska ve Twardowska, 2004).

Sektörel büyüklük ve su kullanım miktarları dikkate alındığında madencilik, atıksu oluşumu bakımından da önemli bir paydaya sahiptir. Su, madencilik faaliyetlerinin hemen hemen her aşamasında kullanılmaktadır. Üretim öncesi rezerv belirleme amaçlı gerçekleştirilen sondaj işlemlerinde kırıntıların uzaklaştırılması, matkap uçlarının soğutulması ve tozumanın önlenmesi vb. amaçlarla kullanılan su, madencilik faaliyetlerinin başlaması ile açık ocak madenciliği, yeraltı madenciliği ve doğaltaş işleme tesislerinde (mermer, granit, traverten vb. blokların ebatlanması) ise kullanılan ekipmanların kazıcı/kesici uçlarının soğutulması, kazı/kesme işlemi gerçekleştirilmiş cevher kütlelerinin yüzeyden uzaklaştırılması, tozumanın önlenmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Ediz vd. 2001; Mavis, 2003; Ağırtaş, 2017).

Madencilik faaliyetleri sonrasında ise değerli mineralce zengin metalürjik işlemlerde kullanılabilir/satılabilir bir konsantr elde edilmesi amacıyla; kırma/öğütme, zenginleştirme ve susuzlandırma olarak isimlendirilen bir dizi cevher hazırlama/zenginleştirme yöntemleri uygulanır. Gerçekleştirilen bu cevher hazırlama/zenginleştirme ve kömür yıkama işlemleri istisnai durumlar hariç (kırma, havalı sınıflandırma/zenginleştirme işlemleri, cevherde çözünebilir metal tuzlarının bulunması vb.) sulu ortamlarda yapılmaktadır. Su kullanım miktarları uygulanan yöntemlere göre değişkenlik göstermekte olup ortalama değerler Tablo 1'de verilmiştir. Belirtilen işlemlerin herhangi bir aşamasında elde edilen atıksu çoğunlukla su ve katı mineral tanelerinden oluşmaktadır. Tesisin bir kesintiye uğramadan üretimini sürdürebilmesi için gerekli olan su çoğunlukla atıksuya uygulanan katı/sıvı ayrımı (susuzlandırma) işlemleri ile sağlanmaktadır (İpekoğlu, 1997; Özün, 2018).

Tablo 1. Madencilik faaliyetlerinde su tüketim miktarları (Water consumption amount in mining) (Torun, 1961; Mavis, 2003; Kızıman, 2009; Mutlutürk, 2018)

Uygulanan yöntem	Su tüketimi (yaklaşık bürüt değer)
Sondaj ¹	2-5 gpm delik
Kırma (toz kontrolü amaçlı) ²	1-6 gpt
Yaş eleme	3-250 gpt
Öğütme (çubuklu/bilyalı değirmen)	500-700 gpt
Yarı otojen öğütme	475-700 gpt
Sallantılı masa ile zenginleştirme	370 gpt (+100 gpt yıkama suyu)
Jig ile zenginleştirme	160-475 gpt
Elmas tel ile doğaltaş blok üretimi ³	380-630 l/m ³ blok kesim
Katrak ile doğaltaş ebatlama	2.650 l/m ² kesim
S/T ile doğaltaş ebatlama	875 l/m ² kesim

¹galon= 3.78 litre, ¹gpm: galon/metre, ²gpt: galon/ton cevher, ³l/m³: litre/m³

Atıksuyun katı partiküllerden arındırılmadan tesiste kullanılması durumunda atıksuda bulunan ufalanmış mineral taneleri nedeniyle kazıcı/kesici uçların kesme performansları azalmakta, kesici üniteler daha çabuk aşınmakta ve su aktarma pompalarında tıkanma vb. sorunlar ortaya çıkmaktadır (Acar, 2001; Celik ve Sabah, 2008). Cevher hazırlama/zenginleştirme ve kömür yıkama işlemlerinde ise atıksuyun içerdiği katı partiküllerden yeterince arındırılmaması durumunda artan pülp vizkozitesi, ortam yoğunluğu vb. nedenlerle öğütme, sınıflandırma ve zenginleştirme işlemlerinin verimi azalmaktadır (Özün, 2018).

Dünya tatlı su rezervlerinin nüfus, endüstriyel üretim ve tarım faaliyetlerinin artışı gibi nedenlere bağlı olarak

azalması, ve tatlı su kaynaklarına olan talebin her geçen gün artması; su kullanımı kaçınılmaz olan birçok endüstriyel uygulamada olduğu gibi madencilik sektöründe de atıksuyun hızlı bir şekilde geri dönüştürülmesi işlemlerinin önemini artırmaktadır. Birden çok yöntemin bir arada kullanımı ile gerçekleştirilebilen katı/sıvı ayırım işlemlerinde suyun yaklaşık %50-60'ı çöktürme, yaklaşık %20-30'u da filtrasyon işlemleriyle geri kazanılabilmektedir. Singh vd. (1996) tarafından gerçekleştirilen araştırmada atıksuyun etkin bir şekilde geri dönüşümü ve tesiste tekrar kullanımı ile tesisin üretime devam edebilmesi için gerekli olan ilave su ihtiyacının %50 oranında azalttığı bildirilmiştir. Böylece, tesisin coğrafi konumundaki su geliri (yağmur, dere, yer altı suları vb.) de dikkate alınarak, oluşan atıksuyun içerdiği katı partiküllerden kısmen/tamamen arındırılarak tesiste tekrar kullanılması ve tesis için gerekli ilave su ihtiyacı azaltılabilmektedir. Ayrıca geri dönüştürülen suda bulunan kalıntı reaktifler flotasyonla zenginleştirme işlemi gerçekleştiren tesislerde reaktif kullanım miktarının da azalmasını sağlayabilmektedir (Coleman ve Wallace, 1978). Bunlara ek olarak atıksuyun doğaya deşarj edilmesi durumunda su niteliklerinin yönetmeliklere (Resmi Gazete, 2004) uygun olması gerekmektedir. Böylece çevresel kirliliğin önüne geçilirken doğal yaşamın zarar görmesi de engellenebilmektedir (Sayılğan ve Karacan, 2019). Bu bağlamda bu çalışma kapsamında madencilik sektöründe yaygın olarak uygulanan atıksu yönetimi ve katı/sıvı ayırım yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmesi hedeflenmiştir.

2. Atıksu İçerisindeki Mineral Tanelerinin Çökeltme Davranışları (Settling Behavior of Mineral Particles in Wastewater)

Madencilik faaliyetlerinde atıksular uygulanan yöntemle bağlı olarak iri boyutlardan çok ince boyutlara kadar geniş bir tane boyutu dağılımına sahip mineral taneleri (çoğunlukla gang; değersiz mineraller) ve sudan oluşmaktadır. Patlatma, kazı işlemleri ve kırma/öğütme vb. işlemler esnasında oluşan zenginleştirme boyut altı (şlam; çok ince boyutlu mineral taneleri) değerli mineraller ve bunlara ek olarak tesisin öğütme/zenginleştirme verimine bağlı olarak değerli mineral ve/veya bağlı taneler (serbestleşmemiş değerli mineral taneleri) de atıksu içerisine karışabilmektedir.

Mineral taneleri ve su arasındaki yoğunluk farkının çok fazla olması nedeniyle en verimli katı/sıvı ayırım yöntemi olarak çökeltme işlemleri uygulanmaktadır (İpekoğlu, 1997). Çökeltme yönteminde mineral tanelerinin akışkan içerisindeki çökeltme hızları yoğunlukları, tane şekilleri, yüzey pürüzlülük özellikleri ve tane boyutları gibi birçok kuvvetin etkisine bağlı olarak değişmektedir. Küresel taneler yassı ve yapraksı tanelere göre, yoğunluğu yüksek olanlar da düşük yoğunluklu mineral tanelerine göre daha hızlı çökeltmektedir (de Haan, 2015).

Mineral tanelerinin çökeltme hızlarını etkileyen bir diğer önemli değişken ise mineral tane boyutudur. Tablo 2'de 2.65 g/cm³ yoğunluklu mineral için verilen değerler incelendiğinde, benzer koşullar için iri boyutlu mineral tanesi için saniyeler içinde çökeltme işlemi gerçekleşirken, aynı yoğunluklu mineral tanesinin çökeltme hızı küçülen tane boyutu ile azalmakta; mikron boyutlu taneler için saatleri bulabilmektedir (Bratby, 1993). Kendiliğinden çökemedikleri için klasik fiziksel arıtma yöntemleriyle ayrılamayan (Öztürk vd. 2005) kolloidal boyutlu (1 nm-0.1 nm) taneler için ise bu süre yılları bulabilmektedir (Bratby, 1993).

Tablo 2. Partikül tane boyutlarının sınıflandırılması (Classification of particle sizes) (Bratby, 1993)

Tane Boyutu (mm)	Sınıflandırma	Örnekler	100 mm çökeltme için gerekli süre*
10			0.1 saniye
1	Kaba dağılım (Gözle görülebilir)	Çakıl, kalın taneli kum, mineral maddeler, çöktürülmüş ve topaklanmış partiküller, alüvyon	1 saniye
10 ⁻¹			13 saniye
10 ⁻²			11 dakika
10 ⁻³	İnce tane dağılımı (gözle görülebilir)	Mineral taneler, çöktürülmüş ve topaklanmış taneler, alüvyon, bakteriler, plankton ve diğer organizmalar	20 saat
10 ⁻⁴			80 gün
10 ⁻⁵			1 yıl
10 ⁻⁶	Kolloidal dağılım	Mineral taneler, hidroliz ve çöktürülmüş ürünler, makro moleküller	20 yıl

*Yoğunluk: 2.65 g/cm³

Atıksuyun iri boyutta mineral taneleri içermesi durumunda eleme (hareketli; titreşimli elekler ve sabit; kavisli elek kullanımı) ile suyun mineral tanelerinden süzülerek ayrılması sağlanabilmektedir. Ancak mineral tane boyutlarının küçülmesi ile katı/sıvı ayırım verimi de hızla azalmaktadır. Bu durumda gravite, merkezkaç vb.

kuvvetlerin kullanıldığı tükenerler (koyulaştırıcılar), susuzlaştırma elekleri, santrifüjler, vakum filtreler ve basınç filtrelerin kullanımı ile katı/sıvı ayırım verimi artırılmaktadır. Böylece büyük oranda katı partiküllerden arındırılmış su ve daha düşük nem seviyesine sahip konsantre ürünler elde edilebilmektedir. Gerçekleştirilen katı/sıvı ayırım işlemleri ile ayrıca konsantrelerin kullanım özelliklerini iyileştirmek ve nakliye maliyetlerinin azaltılması amacıyla uygulanan termal kurutma için gerekli enerjiden de tasarruf edilmektedir (Wu vd. 2010).

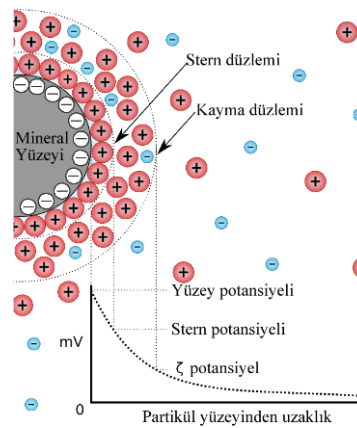
3. Mineral Yüzey Özelliklerinin Çökme Davranışlarına Etkisi (Effect of Mineral Surface Properties on Their Settling Rates)

Su veya sulu çözelti ile temas halinde iken minerallerin çoğunun yüzeyinde; iyonizasyon, iyonik adsorpsiyon, belirli kristal yapıdan kaynaklanan yükler ve iyonik çözünme vb. işlemlerin bir ya da birkaçının etkisi ile yükler oluşur. Mikron ve mikron altı boyutların etkin olduğu durumlarda küçük bir yüzey yükünün varlığı, yokluğu ve büyüklüğü; kararlılık, çevreye duyarlılık, elektrokinetik özellikler vb. faktörler açısından önemli sonuçlar doğurabilir (Myers, 1999).

Süspansiyonun dengesini belirleyen önemli değişkenlerden birisi olan mineral yüzeyinde oluşan yük, çevresindeki suyun yapısını ve ortamda bulunan iyonların dağılımıdır. Çözeltide bulunan yüzey yükü ile zıt yüklü iyonların mineral tane yüzeylerine doğru hareketi ile mineral yüzeyinde derişimleri artarken, benzer yüklü iyonlar ise yüzeyden itilmekte ve mineral yüzeyindeki derişimleri azalmaktadır. Bu durumda sıvı içinde hareketi esnasında katı mineral tanesini çevreleyen ve yüzeyiyle zıt iyonlarla yüklü olan bir tabaka da partikülle birlikte hareket etmektedir (Hunter, 1981; Shaw, 1970; Fuerstenau vd. 1985). Bu tabakanın dış yüzeyi ile bir bütün olarak sıvı arasındaki potansiyel fark, elektrokinetik potansiyel veya zeta potansiyel (ζ) olarak adlandırılmakta ve $\pm mV$ cinsinden ifade edilmektedir.

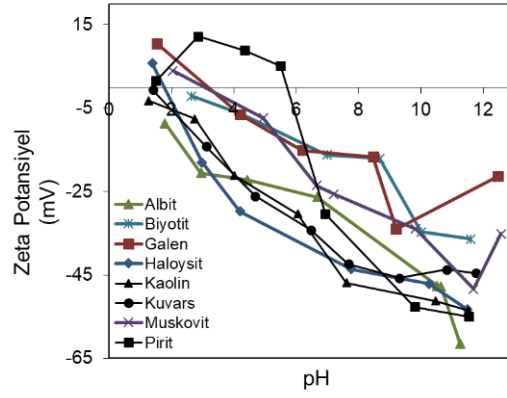
Zeta potansiyel değeri (Şekil 1); bir mineral tanesinin elektriksel çift tabakasından (EÇT) birini oluşturan difüze tabakada bulunan kayma düzlemi üzerindeki ölçülebilir yüzey potansiyelidir. Mineral-su arayüz özelliklerinin önem teşkil ettiği birçok cevher hazırlama/zenginleştirme sürecinde olduğu gibi katı/sıvı ayırım işlemlerinde de büyük bir öneme sahiptir (Ocepek, 1989; Salopek vd., 1992).

Mineral tanelerinin özellikleri, ortam pH değeri vb. değişkenlere bağlı olarak değişen zeta potansiyel (Şekil 2) şiddetinin artması ile birlikte koloidal mineral taneleri arasındaki itme kuvveti artmaktadır (dispersiyon, yayılma). Mineral tanelerinin net bir pozitif ya da negatif yük taşımadığı pH değeri olan izoelektrik noktada (pH_{iep}) ise elektriksel çift tabaka ortadan kalkmaktadır. Böylece mineral taneleri arasındaki itme kuvveti kaybolmakta ve topaklanma meydana gelmektedir. Koloidal sistemlerde zeta potansiyel değerleri ayrıca, flokülasyon ve koagülasyonda kullanılan reaktifler ile mineral taneleri arasında gerçekleşen adsorbsiyon mekanizmaları hakkında da bilgiler vermektedir.



Şekil 1. Elektriksel çift tabaka şematik gösterimi (Schematical representation of electrical double layer)

Bunlara ek olarak atıksudaki mineral tanelerinin hidrofobik (su sevmez) yüzey özelliklerine sahip olması durumunda, mineral taneleri sıvı ortama bir yakınlık göstermezler ve elektrolit ortamda kararsız davranırlar. Bu durum mineral tanelerinin kolayca koagüle olmalarına olanak tanımaktadır (Öztürk vd. 2005, Eckenfelder 1989).



Şekil 2. Minerallerin pH'a bağlı zeta potansiyel değerleri (pH vs zeta potential values of minerals) (Özün ve Atalay, 2016; Özün vd. 2019; Özün vd. 2019)

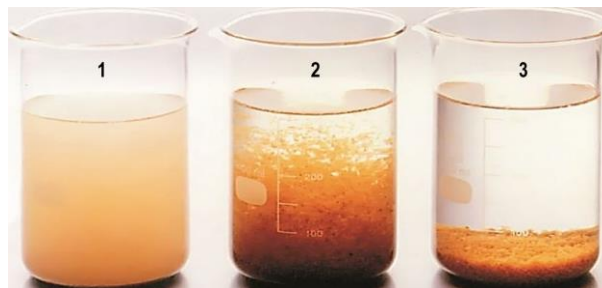
4. Atıksudaki Mineral Tanelerinin Çökeltme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles in Wastewater)

Katı tanelerin sudaki çökeltme hızları başlıca; tane boyutu, tane şekli, yüzey özellikleri ve yoğunluğu, süspansiyonun ya da pülpün % katı oranı, sıvının viskozitesi ve yoğunluğu gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Svarovsky, 1981; Mpofu, 2005).

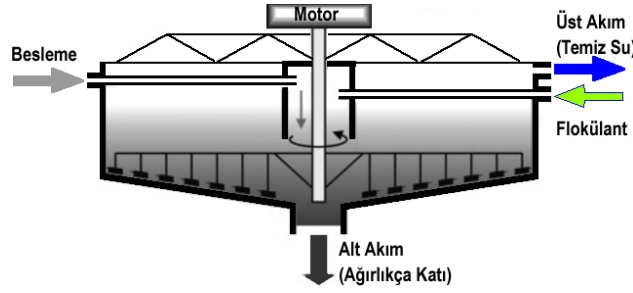
Kolloidal sistemlerde benzer yüzey yüklerine sahip katı mineral taneleri akışkan içerisinde elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile birbirlerini her yönde itmekte ve gelişigüzel (Brownian hareket) hareket etmektedirler. Bu sebeple özellikle -50 mikron boyutlu taneler için normal çökeltme işlemleri uygulanan katı/sıvı ayırım işlemlerinde yüksek çökeltme hızı ve yüksek katı oranı elde edilememektedir. Mineral tanelerinin çökeltmelerini zorlaştıran bu durumun ortadan kaldırılması (kararsızlaştırma) için katı/sıvı ayırım işlemlerinde etkili yüzey yükünün azaltılması, yüzey yükünün etki alanının azaltılması ve yüzeye adsorbe edilen su moleküllerinin sayısının azaltılması gerekmektedir. Böylece akışkan içerisinde birbirlerinden ayrı kalan mineral taneleri birbirlerine yeterince yaklaşmakta, London-Van der Waals çekim kuvvetlerinin etkisi ile bir araya gelebilmekte ve sonuç olarak kütleleri büyümektedir (Şekil 3). Artan kütlelerin etkisi ile mineral tanelerinin su içerisinde çökeltme hızları da artmaktadır (Eckenfelder 1989; Bratby, 1993; Gülsün Kılıç ve Hoşten, 2009). Mineral tanelerinin çökeltme hızları atıksuyu oluşturan katı partiküllerin yüzey özelliklerine bağlı olarak çeşitli koagülant ve doğal/sentetik flokülantların kullanımı ile gerçekleştirilmektedir.

Tesis atıksuyunda mineral tanelerinin bir araya getirilmesi ve katı/sıvı ayırım işlemlerinin hızlandırılması; kesikli ya da sürekli olarak çalışabilen, ağırlıkça katı içeren yüksek alt akış yoğunlukları sağlayan, üst kısmından temiz suyun taşarak alındığı, sıg, konik şekilli taban ve büyük çaplı silindirik gövdeden oluşan tikinerler ile sağlanmaktadır (Şekil 4). Sürekli çalışan tikinerlerin çapları 2-200 metre ve derinlikleri de 1-7 metre olabilmektedir. Özellikle son yıllardaki gelişmelere bağlı olarak susuzlaştırılması zor cevherlerin işlenmesinde de daha yüksek alt akış yoğunlukları sağlayan tikinerlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Mineral tanelerinin çökeltme hızları ayrıca; merkezkaç kuvveti etkisi ile çöktürme işlemi gerçekleştiren ekipmanların kullanımıyla da artırılabilmektedir ve katı/sıvı ayırım işlemi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Askıda (1) mineral tanelerinin bir araya getirilerek çökeltilmesi (2-3) (Flocculation (2-3) of suspended mineral particles (1)) (SNF, 2020)



Şekil 4. Silindirik tikiner kesit görünümü (Cross-sectional view of cylindrical thickener)

4.1. Koagülasyon Yöntemi ile Mineral Tanelerinin Çökeltme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles by Coagulation)

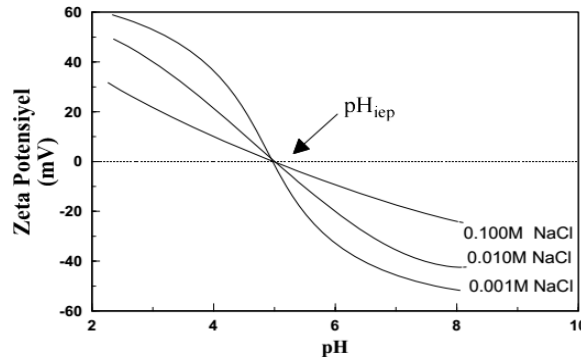
Koagülasyon ve flokülasyon; bir sıvı içerisinde çökmeden askıda duran kolloidal boyutlu katı tanelerin bir araya getirilmesi (topaklanma, kümeleşme, salkımlaşma vb.) anlamına gelmektedir (Tatsi vd., 2003). Suda ve sanayi atıksularında katı/sıvı ayrımının gerçekleştirilmesi çoğunlukla bu iki yöntem ile sağlanmakta ve gerçekleştirilen işlemler sonucunda katı/sıvı süspansiyonunda aşağıda belirtilen iki sonuç elde edilmektedir (Ersoy vd., 2005);

- Süspansiyon karışımında çökmeden askıda duran ya da kendi kendilerine çökmesi çok yavaş olan partiküllerin çökmesini sağlamak,
- Suyun/atıksuyun daha temiz ve berrak olmasını sağlamak.

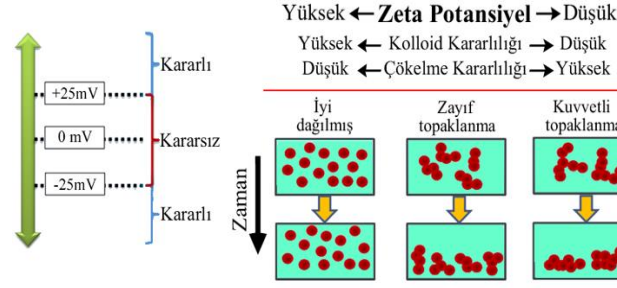
Her iki işlemde de boyutlarını büyütürken mineral tanelerinin daha hızlı çökelmelerini sağlamak amaç olsa da, flokülasyon ve koagülasyon farklı yöntemlerdir. Koagülasyon işleminde çok değerlikli (Fe^{3+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- vb.) inorganik elektrolitler (koagülantlar: alum ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$), ferrik klorür ($FeCl_3$), ferrik sülfat ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$), sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) vb.) yardımı ile süspansiyon kararsız hale getirilmektedir. Mineral tanelerinin zeta potansiyel değerleri önemli bir parametredir. Topaklanma; ortama mineral tanelerinin zeta potansiyel değerleri ile zıt yüklü iyon/iyonların ilavesiyle, ve koagülantların mineral tanelerinin yüzey yüklerini nötrlestirmesi, EÇT'yi daraltması, mineral taneleri ile hidrojen bağı ya da karmaşık bağlar kurması sonucunda meydana gelmektedir (Svarovsky, 2000; Öztürk vd., 2005). Koagülasyon ile 1 mm boyutuna kadar topaklar elde edilebilmektedir (Svarovsky, 2000).

Bilindiği gibi EÇT'nin kalınlığı minerallerin akışkan içindeki davranışlarını da etkilemektedir. Süspansiyon içerisindeki mineral taneleri pH_{iep} 'den daha asidik veya daha bazik pH değerlerinde pozitif ya da negatif yönde artan zeta potansiyel şiddetinin de etkisiyle daha kararlı davranmaktadırlar (Şekil 5-6).

Süspansiyon içindeki mineral taneciklerinin yükü ile zıt yüklü iyonların varlığı, miktarı ve değerlikleri EÇT'yi etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Schulze-Hardy yasasına göre ($1/z^6$; z: iyon değerliği) yüksek değerlikli iyonlar düşük değerlikli iyonlarla karşılaştırıldığında EÇT'yi daha etkin bir şekilde daraltmakta ve artan iyon değerliğine bağlı olarak kritik koagülasyon derişimi (KKD) de azalmaktadır (Bratby, 1993; Szilagyi vd. 2012; Özün ve Ağırtmış Ulus, 2019). Bunun yanı sıra, gerçekleştirilecek işlemin amacına bağlı olarak kullanılan koagülant miktarı ve uygun ortam pH değerleri de değişiklik göstermektedir (Amirtharajah, 1982). Belirlenen ideal koşullarda uygulanan koagülasyon işlemi ile mineral taneleri etrafındaki EÇT daraltmakta (Şekil 5-6), mineral tanelerinin süspansiyon içerisindeki hareketleri kararsızlaşmakta (yaklaşık ± 25 mV zeta potansiyel değerlerinde) ve mineral taneleri salkımlaşmaktadır (Eckenfelder, 1989; Şengül ve Küçükgül, 1997; Öztürk vd., 2005; Özün ve Ağırtmış Ulus, 2019).



Şekil 5. Çözeltideki elektrolit derişimi ve pH'a bağlı zeta potansiyel değişim grafiği (Graph of electrolyte concentration vs pH dependent zeta potential) (Drzymala, 2007)

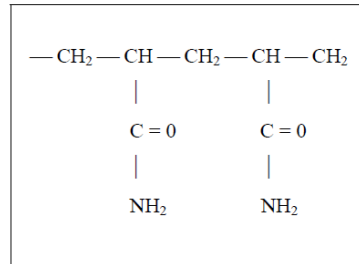


Şekil 6. Zeta potansiyelin süspansiyon özelliklerine etkisi (Effect of zeta potential on suspension properties)

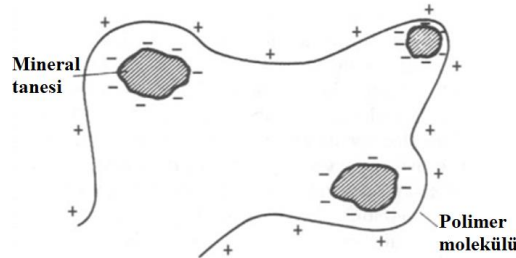
4.2. Flokülasyon Yöntemi ile Mineral Tanelerinin Çökeltme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles by Flocculation)

Flokülasyon yönteminde katı partikülleri salkımlaştırma işlemi ortama katılan yüksek molekül ağırlıklı organik elektrolitler (sodyum poliakrilat, polinivil alkol, polidialidimetilamonyum vb.), diğer adıyla polimerler veya flokülantlar ile gerçekleştirilmektedir (Bratby, 1993). Genel olarak sentetik ve doğal olarak ikiye ayrılan flokülantların en önemli özellikleri 20.000.000 g/mol'a kadar çıkabilen çok yüksek molekül ağırlıklarına sahip olmalarıdır (Tablo 3) (Yılmaztürk, 2011). Sentetik flokülantlara göre çok düşük molekül ağırlığına ve flokülasyon etkinliğine sahip olan doğal flokülantlar çeşitli bitki ve sebze tohumlarından elde edilen doğal organik maddeler olup, nişasta, reçine, aljinat (deniz yosunu) sık kullanılan doğal flokülantlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Gregory, 1989; İpekoğlu, 1997).

Üç farklı fiziksel yapıda (sıvı, emülsiyon veya katı) üretilmekte olan sentetik flokülantlara örnek olarak en yaygın flokülant türü olan poliakrilamid (PAA) (Şekil 7) ve onun türevleri verilebilmektedir. Uygun miktarda ve pH ortamında kullanımının etkinlik ve ekonomiklik açısından önemli olduğu flokülasyon işlemleri ile 10 mm boyutlarında salkımlar elde edilebilmektedir (Svarovsky, 2000) (Şekil 8).



Şekil 7. Poliakrilamid'in açık formülü (Formula of polyacrylamide) (İpekoğlu, 1997)



Şekil 8. Poliakrilamid-mineral taneleri arası etkileşim (Interaction between polyacrylamide-mineral particles) (Wills ve Napier-Munn)

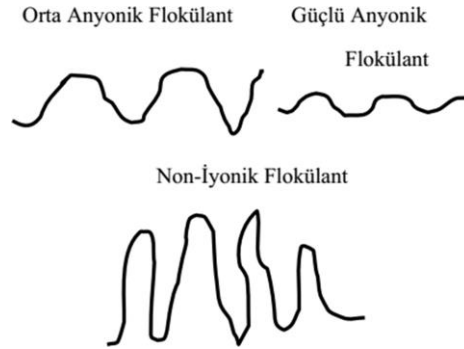
Sentetik flokülantlar iyonizasyon durumlarına göre anyonik, katyonik ve iyonik olmayanlar olmak üzere üç'e ayrılmaktadır. Temel olarak iyonik olmayan bir yapıya sahip olan PAA'nın bazı amid gruplarının (-NH₂) bazik pH koşullarında hidrolize uğramasıyla veya akrilikasit (CH₂=CHOOH) ile bir arada polimerleşmesi sonucu anyonik tip flokülantlar elde edilirken (Ersoy, 2003), PAA'nın dimetil-aminoetil akrilat veya metil akrilat gibi akrilamidin amin türevleri gibi uygun bir katyonik monomer ile bir arada polimerleşmesi sonucunda katyonik tür flokülantlar da elde edilebilmektedir (Demiral, 2013). İyonik olmayan flokülantların ise iyon olmayan grubunda çoğunlukla çok sayıda oksijen, azot veya kükürt atomları bulunmaktadır. Anyonik ve katyonik flokülantlarda olduğu gibi en yaygın iyonik olmayan flokülantlar da PAA esaslı flokülantlardır (Gregory, 1989). İyonik olmayan flokülantlar kıvrımlı ve

yumaklaşmış bir yapıya sahip iken, artan iyoniklik derecesi ile birlikte polimer, taneler arasında köprü oluşumunu kolaylaştıran daha düz ve uzun bir yapı sergilemektedir (Şekil 9) (Stutzmann ve Siffert 1997; Ersoy, 2003).

Flokülanların molekül ağırlıkları ve anyoniklik/katyoniklik dereceleri (düşük, orta ve yüksek) polimerizasyon reaksiyonları kontrol edilerek ayarlanabilmekte olup (Ersoy, 2003), flokülasyon verimleri molekül ağırlığı, kullanım miktarı, karıştırma süresi/hızı, pH ve süspansiyonun sıcaklığı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Ethem, 1975; Işık, 2015; Ağırılmış, 2017; Özün ve Ağırılmış Ulus, 2019). Flokülant olarak kullanılan polimerler süspansiyondaki katı tanelerin yüzeyine elektrostatik (iyon köprüsü ile), kovalent ve hidrojen bağ mekanizmalarından, şartlara bağlı olarak biri ya da birkaçının bir arada etkileşimi ile adsorplanmaktadır (Gregory, 1989; Stutzmann ve Siffert, 1997; Somasundaran ve Das, 1998).

Tablo 3. Molekül ağırlıklarına göre flokülantların sınıflandırılması (Classification of flocculants according to molecular weights) (Demiral, 2013; Işık, 2015)

Molekül Ağırlığı (g/mol)	Genel Tanımlama
10.000.000 ve üstü	Çok yüksek
1.000.000 – 10.000.000	Yüksek
200.000 – 1.000.000	Orta
100.000 – 200.000	Düşük
50.000 – 100.000	Çok düşük
50.000'den az	Çok çok düşük



Şekil 9. İyoniklik derecesinin flokülant yapısına etkisi (Effect of the ionic strength on flocculant structure) (Demiral, 2013)

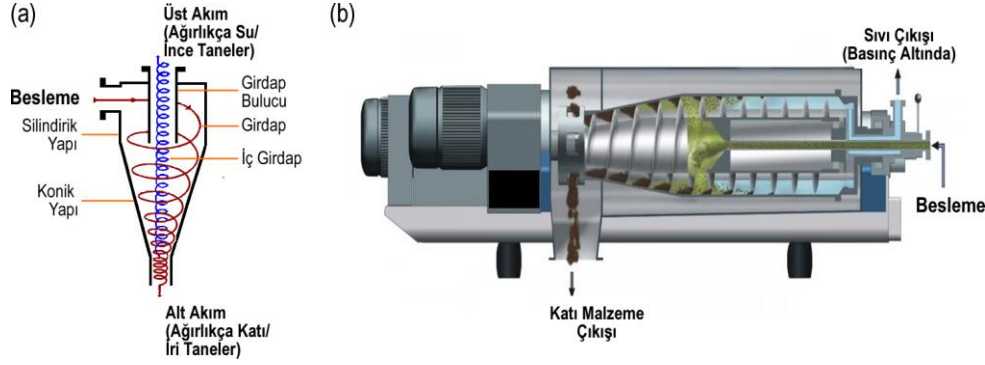
4.3. Merkezkaç Kuvvetinin Etkisi ile Mineral Tanelerinin Çökme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles by Centrifugal Force)

Atıksuda çok yavaş çökme hızlarına sahip olan ince boyutlu mineral tanelerinin çökme hızları merkezkaç kuvvetinin etkisiyle artırılabilir. Bu yöntem ile gravite alanında hareketsiz olan koloidal tanelerin dahi çökeltmesi sağlanabilmektedir (İpekoğlu, 1997). Hidrosiklonlar ve santrifüjler yaygın olarak kullanılan, merkezkaç kuvveti etkisi ile mineral tanelerinin çökme hızlarını artıran ekipmanlardır.

Silindirik, konik ve silindir-konik olarak sınıflandırılan hidrosiklonlar hareketli parçalara sahip değildir (Şekil 10 (a)). Çoğunlukla cevher hazırlama tesislerinde minerallerin boyutlarına göre sınıflandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, basit yapısal özellikleri ve düşük yatırım/işletme maliyetlerinden dolayı katı/sıvı ayırımı ve susuzlandırma işlemleri için de tercih edilmektedirler. Ancak merkezkaç kuvveti kullanarak katı/sıvı ayırma işlemlerini başarı ile gerçekleştirirler de, ayırma performansları ince boyutlu malzemeler için yeterli olmamaktadır. Özellikle düşük yoğunluklu <10 mikron boyutlu malzeme üst akıma kaçabilmekte, flokülant ile birlikte kullanımlarında da hidrosiklon içindeki yüksek kesme kuvvetleri, oluşturulan salkımların dağılmasına neden olmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006). Bu sebeple madencilik alanında hidrosiklonlarla karşılaştırıldığında daha karmaşık ve pahalı olan santrifüjler tercih edilmektedir.

Santrifüjler; aralarında yüksek yoğunluk farkı bulunan katı/sıvı ayırma işlemini merkezkaç kuvveti kullanılarak oluşturulan yerçekiminin birkaç katı ivmeler yardımıyla gerçekleştirirler (Hacıfazlıoğlu, 2016). Sürekli boşaltım imkanı sağlaması ve oldukça yüksek katı konsantrasyonları oluşturması nedeniyle madencilik uygulamalarında ve cevher hazırlama işlemlerinde en yaygın kullanım alanı bulan santrifüjler ise spiral boşaltmalı çanaklı santrifüjlerdir. Spiral çanaklı sınıflandırıcılar esasen silindirik konik biçimli, yatay bir döner kabuk veya çanakta oluşur (Şekil 10(b)). Çanağın içinde ise çanakla aynı yönde ve daha yüksek/daha düşük hızda dönmekte olan bir vidalı konveyör bulunmaktadır. 1600-8500 devir/dakika yüksek hızla dönerek oluşturulan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle mineral tanelerinin hızla ekipmanın çeperine çökmesi sağlanmakta ve çökelen mineral taneleri spiraller

vasıtasıyla uzaklaştırılmaktadır (İpekoğlu, 1997). Çökeltme sonrası % 5-20 nem içerikli katı ürün elde edilmesini sağlayan spiral boşaltmalı çanaklı santrifüjler, genel olarak 10 mikrondan daha ince taneleri yeterince tutamamaları ve 1 mikron tane boyutlarına kadar etkin susuzlandırma işlemi gerçekleştiren filtreler kadar etkili olmadıklarından dolayı şlam susuzlandırma işlemlerinde tercih edilirler (Ateşok, 2009; Hacıfazlıoğlu, 2016).



Şekil 10. (a) Hidrosiklon ve (b) spiral boşaltmalı çanaklı santrifüj ((a) Hydrocyclone and (b) spiral discharge bowl centrifuge) (Flottwet, 2018)

5. Filtrasyon (Filtration)

Filtrasyon, katı mineral tanelerinin geçmesini engelleyen, ancak sıvının geçmesine izin veren gözenekli bir ortam aracılığıyla katuları sıvıdan ayırma işlemidir. Filtrelemenin gerçekleştirildiği koşullar çok çeşitli olmakla birlikte en uygun ekipman türünün seçimi çok sayıda faktöre bağlıdır. Endüstriyel ölçekte genellikle <300 mikron boyutlu malzemelerin susuzlandırılması amacıyla uygulanan filtrasyon işleminde iki ortam arasındaki basınç farkından faydalanılır. Filtreleme oranı; filtre yüzey alanı, filtre edilecek süspansiyon ya da atıksuyun viskozitesi, filtre kekinin (katı ürün) direnci vb. faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Wills ve Napier-Munn, 2006; Hacıfazlıoğlu, 2016).

Filtrasyon çoğunlukla tikinlerde gerçekleştirilen koyulaştırma işlemleri sonrası uygulanır. Şlam boyutlu malzemelerin filtre yüzeylerini tıkanmasını önlemek için genelde filtreleme öncesi karıştırıcılara ilave edilen flokülantlar ile taneler arası boşluğun artırılması ve dolayısıyla filtrasyon işleminin kolaylaştırması sağlanır. Yüksek molekül ağırlıklı flokülant kullanımında oluşan salkımların boyutlarının büyük olması ve çok su içermesi filtre kekinin su içeriğini artırmaktadır. Bu sebeple filtrasyon işlemleri öncesinde düşük molekül ağırlıklı flokülantlar tercih edilmektedir (Moss, 1978; Wills ve Napier-Munn, 2006). Ayrıca suyun filtrelerden geçişini kolaylaştırmak amacıyla yüzey gerilimini azaltıcı kimyasallar da kullanılmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Filtrasyon işlemlerinde maliyetlerinin düşüklüğü ve çok çeşitli şekillerde dokunmuş yüzeylere sahip olmaları sebebiyle en yaygın kullanılan filtre malzemesi pamuklu kumaşlardır. Mekanik olarak güçlü, korozyona dirençli ve filtratın akışına mümkün olduğunca az direnç göstermesi gereken filtre malzemeleri yün, keten, naylon, ipek, cam elyafı, gözenekli karbon, metaller, suni ipek ve diğer sentetik/gözenekli kauçuk vb. malzemelerden oluşabilmektedir (Concha, 2014).

Madencilik ve cevher hazırlama/zenginleştirme tesislerinde filtrasyon işlemi kesikli ya da sürekli olarak uygulanabilmektedir. Vakum ve basınç uygulayarak çalışan filtre ekipmanlarında besleme ortalama tane boyutu <10 mikron olduğu durumlarda basınçlı filtreler tercih edilirken (Şekil 11(a)), yüksek kapasitede besleme olması durumunda ise sürekli çalışan vakumlu (tambur, bant veya disk) filtreler (Şekil 11(b) - 12(a-b)) kullanım alanı bulmaktadır. Filtrasyon işlemine tabi tutulan pülp özelliklerine bağlı olarak filtrasyon sonucunda elde edilen katı ürünün nem içeriği vakumlu filtrelerin kullanımı ile ortalama %25-30'a, basınçlı filtrelerin kullanımı ile ise %7.5-12.5'e (ortalama %15-20) kadar düşürülebilmektedir. Kullanılan yüksek basınçlardan dolayı filtrasyonda daha yüksek akış hızları ve, daha iyi yıkama/kurutma sonuçlarının sağlanması nedeni ile basınç altında filtreleme vakuma kıyasla daha avantajlı görülmektedir. Ancak filtrasyon sonrası katıların basınçlı filtre bölmesinden sürekli olarak uzaklaştırılması son derece zor olabilmekte ve sonuç olarak, sürekli çalışan basınçlı filtreler mevcut olmasına rağmen, büyük çoğunluğu kesikli olarak çalışmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Kapasitelerinin yüksekliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan tambur, disk ve yatay vakumlu filtrelerin yerini ise, günümüz teknolojik gelişmelerine bağlı olarak üretilen daha yüksek basınçlar yardımıyla katı ürün nemini %8'e kadar indirebilen hiperbarik (basınç odalı) filtreler (Şekil 13(b)) (disk, tambur, bant vb.) almaya başlamıştır (Hand, 2000; Yoon 2006; Drummond vd. 2015). Ayrıca son yıllarda filtre bezi ile kaplanmış çelik filtrelerin kullanımı yerine, filtre malzemesi gerektirmeyen 1.5-2.0 mikron boyutlu gözeneklere sahip seramik filtrelerin kullanımı da yaygınlaşmaktadır (Concha, 2014).

Bu bağlamda gerek satılabilir konsantre nem miktarının ideal değerlere getirilmesi, gerek tesis işleyişinin aksamaması için gerekli suyun temin edilmesi, gerekse su ve doğanın kirlenmesinin önüne geçilmesi amacıyla çoğunlukla çöktürme esasına dayalı olarak gerçekleştirilen katı/sıvı ayırım işlemlerinde hız ve etkinlik önemli değişkenlerin başında gelmektedir. Katı/sıvı ayırımının etkin bir şekilde uygulanması ile atıksuyun büyük bir bölümünün tekrar temiz suya dönüştürülerek tesiste kullanılabilmesi sağlanmakta, dolayısıyla tesis için gerekli olan suyun ilave kaynaklardan kısmen/tamamen karşılanmasının önüne geçilebilmektedir. Bu nedenle katı/sıvı ayırım amaçlı uygulanan yöntemlerin etkinliğinin; teknik bilgi birikimi ve bilimsel doğrular dikkate alınarak gerçekleştirilecek araştırma-geliştirme (ar-ge) çalışmaları ile desteklenerek artırılması teşvik edilmeli ve sağlanmalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Acar, H., 2001. Attention Must Be Paid to Matters During the Establishment and the Running of a Wastewater Clarity Unit for a Marble Processing Plant. The Third Marble Symposium, 3-5 May, Afyon, 289-296.
- Ağırtmış, D., 2017. Fonolit İşleme Tesisi Atıksuyunun Koagülasyon ve Flokülasyon Yöntemleriyle Arıtımı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 83 s.
- Amirtharajah, A., Mills, K.M., 1982. Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation, Journal American Water Works Association (AWWA) 74(4), 210-216.
- Andritz, 2020. Hyperbaric disc filter - HBF Andritz Separation, Austria, <http://www.andritz.com/>
- Ateşok, G. 2009. Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, YMGV Yayını, İstanbul.
- Avrupa Birliği Türkiye Delegasyonu, 2018. Madencilik Atıklarının Yönetimi, <https://www.avrupa.info.tr/tr/madencilik-atiklarinin-yonetimi-144>, Erişim Tarihi: 14.10.2020.
- Aznar-Sánchez, J.A.; García-Gómez, J.J.; Velasco-Muñoz, J.F.; Carretero-Gómez, A. Mining Waste and Its Sustainable Management: Advances in Worldwide Research. Minerals 2018, 8, 284.
- Bratby, J., 1993. Coagulation and Flocculation with an Emphasis on Water and Wastewater Treatment, Uplands Press Ltd, Croydon, England, 349 s.
- Celik, M.Y., Sabah E., 2008. Geological and Technical Characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) Marble Deposits and the Impact of Marble Waste on Environmental Pollution. Journal of Environmental Management, 87 (1), 106-116.
- Coleman, R.L., Wallace, B.P., 1978. Tailings disposal in Canada, milling practice in Canada. CIMM, 16, 13-20.
- Concha A.F., 2014. Solid-Liquid Separation in the Mining Industry, Fluid Mechanics and Its Applications Volume 105, Springer International Publishing Switzerland.
- de Haan, A.B., 2015. Solid-Liquid Separation, In Process Technology: An Introduction, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 197-228.
- Demiral, A., 2013. Killerin Elektrokinetik Özellikleri ve Flokülasyonu. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 65 s.
- Drummond, B., Mackinnon, W., Sorensen, C., 2015. Application of the Hyperbaric Disc Filter for Fine Coal Product Dewatering, <http://www.acps.com.au>. Erişim Tarihi: 10.10.2020.
- Drzymala, J., 2007. Mineral Processing: Foundations of Theory and Practice of Minerallurgy, 1st English edition, Wrocław University of Technology Yayınları, Wrocław, Polonya, 502 s.
- Eckenfelder, W.W.Jr., 1989. Industrial Water Pollution Control (Second Edition). McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, Singapur, 600 s.
- Ediz, İ, Beyhan, S., Yuvka, Ş., 2001. Madencilikte Toz Kaynakları ve Kontrolü. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 121-132.
- Ersoy, B., 2003. Mermer İşleme Tesisi Su Arıtımında Kullanılan Flokülantların Tanıtımı. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, 18-19 Aralık, Afyon, 449-462.
- Ersoy, B., Alptekin, A.M., Sarıışık, A., Gürcan, S., Erkan, Z.E., Yıldız, A., 2005. Doğal Taş İşleme Tesisi Atık Sularından Bulanıklığın Giderilmesine Farklı Yöntemlerin ve Farklı Koagülantların Etkisi. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, 5-6 Mayıs, Ankara, 117-125.
- Ethem, M.Y., 1975. Flokülasyon Tekniği ve Günümüzdeki Önemi, Madencilik Dergisi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 14 (3), 21-28.
- Flotwett Separation Technologies, 2018. <https://www.flottweg.com/product-lines/decanter/>, Erişim Tarihi: 10.10.2020.
- Fuerstenau, M.C., Miller, J.D., Kuhn, M.C., 1985. Chemistry of Flotation. Society of Mining Engineers of AIME, New York, 177 s.
- Gregory, J., 1973. Rates of Flocculation of Latex Particles by Cationic Polymer. Journal of Colloid and Interface Science, 42, 448-459.
- Gupta, A., Yan, D., 2016. Mineral Processing Design and Operations: An Introduction Second Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Gülsün Kılıç, M., Hoşten, Ç., 2009. A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. Journal of Hazardous Materials 176(1-3), 735-740.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2016. Kömür Yıkama Tesisi Atıklarının Susuzlandırılmasında Eski ve Yeni Teknolojiler, Bilimsel Madencilik Dergisi Cilt 55, Sayı 3, 17-25.
- Hand, P.E., 2000. Dewatering and Drying of Fine Coal to A Saleable Product. COALTECH 2020.

- Hunter, R.S., 1981. Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications, London Academic Press, Londra, İngiltere, 398 s.
- Işık, S., 2015. İnce Boyutlu Lavvar Tesisi Atığının Susuzlandırılmasında Optimum Flokülasyon Şartlarının Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 72 s.
- İpekoğlu, Ü., 1997. Susuzlandırma ve Yöntemleri. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, 113 s.
- Kıdım, F.B., 2009. Düşük Tenörlü Krom Cevherlerinin Zenginleştirilmesinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81 s.
- Mavis, J., 2003. Water Use in Industries of the Future: Mining Industry, Center for Waste Reduction Technologies for U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Washington, D.C., 47-53.
- Moss, N., 1978. Theory of Flocculation, Mine and Quarry, 7 (May), 57.
- Mpofu, P., Mensah, J.A., Ralston, J., 2003. Investigation of the Effect of the Polymer Structure Type On Flocculation. Rheology and Dewatering Behaviour of Kaolinite Dispersions. International Journal of Mineral Processing 71, 247-268.
- Mutlütürk, M., 2018. Doğaltaş Üretimi ve Su İlişkisi, Bilimsel Madencilik Dergisi, Özel Sayı, 135-142.
- Myers, D., 1999. Surfaces, Interfaces, and Colloids; Principles and Applications, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 493 s.
- Ocepek, D., 1989. Bogatenje Mineralnih in Energetskih Surovin, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, FNT VTOZD, Montanistika, Ljubljana, 350 s.
- Öztürk, İ., Timur, H., Koşkan, U., 2005. Atık Su Arıtımının Esasları. T.C Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Özün, S., Atalay, M.U., 2016. A Comparative Study on Interactions of Ionic Collectors with Orthoclase, Physicochemical Problems of Mineral Processing 52(2), 955-972.
- Özün, S., 2018. Maden İşletme ve Cevher Zenginleştirme Tesislerinde Atıksu Yönetimi. 1. Uluslararası İçmesuyu ve Atıksu Sempozyumu (Afyonkarahisar, Turkey), 73-84.
- Özün, S., Ulus, D.A., 2019. Coagulation and Flocculation Behavior of Fines in Foid-Bearing Rock Processing Plant (FRPP) Wastewater at Alkaline Environment. Powder Technology 344, 335-342.
- Özün, S., Ergen, G., 2019. Determination of Optimum Parameters for Flotation of Galena: Effect of Chain Length and Chain Structure of Xanthates on Flotation Recovery. ACS Omega 4(1), 1516-1524.
- Özün, S., Atalay, M.U., Demirci, S., 2019. Study of Adsorption Characteristics of Long Chain Alkyl Amine and Petroleum Sulfonate on Silicates by Electrokinetic Potential Microflotation FTIR and AFM Analyses. Particulate Science and Technology 37(4), 492-503.
- Özün, S., Vaziri Hassas, B., Miller, J.D., 2019. Collectorless Flotation of Oxidized Pyrite, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 561, 349-356.
- Resmi Gazete, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Çevre ve Orman Bakanlığı Yönetmelikler, 25687 (31/12/2004). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>, Erişim Tarihi: 25.10.2020
- Salopek, B., Krasic, D., Filipovic, S., 1992. Measurement and Application of Zeta-Potential, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 4, Zagreb, 157-151.
- Sayılğan, E., Karacan, G., 2019. Characterization and Evaluation of Removal Conditions of Lead-Zinc-Copper Flotation Plant Waste, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(1), 175-181.
- Shaw, D.J., 1970. Introduction to Colloid and Surface Chemistry, Butterworths, London, 236 s.
- Singh, R. N., Hagare, D., Sivakumar, M., 1996. Wastewater Quality Management in Coal Mines in the Illawarra Region. International Conference on Mining and the Environment, 1-16.
- SNF, <https://www.snf.co.uk/chemical-coagulants-used-water-treatment>, Erişim Tarihi: 10.10.2020.
- Somasundaran, P., Das, K.K., 1998. Flocculation and Selective Flocculation-An Overview. In: Atak S, Önal G., Çelik M.S.(eds), Innovation in Mineral and Coal Processing, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 81-91.
- Stutzmann, Th., Siffert, B., 1997. Contribution to the Adsorption Mechanism of Acetamide and Polacrylamide on to Clays. Clays and Clay Minerals, 25, 392- 406.
- Svarovsky, L., 1981. Characterization of Particles Suspended in Liquids, Solid-Liquid Separation Second edition, Ed. Ladislav Svarovsky, Butterworths-Heinemann Ltd, Oxford, United Kingdom, 8-32.
- Svarovsky, L., 2000. Solid-Liquid Separation (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann, 568 s.
- Szczepańska, J., Twardowska, I., 2004. Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation, in Waste Management Series 4 (Eds. I. Twardowska, H.E. Allen, A.F. Kettrup, W.J. Lacy), 319-385.
- Szilagyı, I., Sadeghpour, A., Borkovec, M., 2012. Destabilization of Colloidal Suspensions by Multivalent Ions and Polyelectrolytes: From Screening to Overcharging, Langmuir 28 (15), 6211-6215. DOI: 10.1021/la300542y
- Şengül, F., Küçükgül, E.Y., 1995. Çevre Mühendisliğinde Fiziksel-Kimyasal Temel İşlemler ve Süreçler, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Yayın No: 153.
- Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A., Samaras, P., 2003. Coagulation-Flocculation Pretreatment of Sanitary Landfill Leachates, Chemosphere, 53, 737-744.
- Torun, R., 1961. Cevher Zenginleştirme-Minerallerin Ayrılma Prensipleri ve Maden Sanayindeki Tatbikatı, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 56(56), 115-131.
- Townsend, I., 2003. Automatic Pressure Filtration in Mining and Metallurgy, Minerals Engineering 16, 165-173.
- Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2006. Mineral Processing Technology, 7th Edition, Elsevier Science & Technology Books, 444 s.
- Wu, Z.H., Hu, Y.J., Lee, D.J., Mujumdar, A.S., Li, Z.Y., 2010. Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry: Potential for Innovation, Drying Technology, 28:7, 834-842, DOI: 10.1080/07373937.2010.490485
- Yılmaztürk, D., 2011. Andezit İşleme Atıksuyunun Fizikokimyasal Arıtımı. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Yoon, R.H., 2006. Advanced Coal Cleaning and Recovery, US-India Coal Working Group Meeting, April 4-5.



YÜKSEKÖĞRETİM KURUMLARININ HİZMET KALİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN KULLANILAN ÖLÇEK VE BOYUTLARIN ARAŞTIRILMASI

Melda KOKOÇ^{1*}, Süleyman ERSÖZ²

¹ Gazi Üniversitesi, Eğitim-Öğretim ve Dış İlişkiler Kurum Koordinatörlüğü, 06560, Ankara, Türkiye

² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Hizmet Kalitesi, Hizmet Kalitesi Ölçeği, Hizmet Kalitesi Boyutları, Yükseköğretim Kurumu.</i>	<p>Yükseköğretim sektörü, artan eğitim talebini karşılamak için hızla büyüyen rekabetçi bir sektör haline gelmiştir. Rekabete dayanan bir pazarda, hizmete yönelik memnuniyetin fark yaratacağı gerçeği, üniversiteleri farklı paydaşlar tarafından algılanan hizmet kalitesinin çeşitli yönlerini geliştirmeye zorlamaktadır. Bu çalışmada, yükseköğretim kurumlarının sunduğu hizmet kalitesine ilişkin algının ölçüldüğü akademik yayınlar incelenmiş ve bu çalışmalarda tercih edilen ya da tasarlanan ölçekler analiz edilmiştir. Ek olarak, söz konusu çalışmalar yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesinin değerlendirilmesinde dikkate alınan boyutlar ve ölçeklerin uygulandığı örneklemeler açısından özetlenerek yorumlanmıştır. Bu çalışmanın, yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesinin değerlendirilmesine ilişkin yapılacak olan çalışmalara yardımcı olması hedeflenmektedir. Ek olarak, yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitelerini değerlendirirken göz ardı etmemeleri gereken boyutların neler olabileceği konusunda çerçeve oluşturması amaçlanmaktadır.</p>

RESEARCH OF SCALES AND DIMENSIONS USED TO EVALUATE THE SERVICE QUALITY OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Keywords	Abstract
<i>Service Quality, Service Quality Scale, Service Quality Dimensions, Higher Education Institution.</i>	<p>The higher education sector has become a rapidly growing competitive sector to meet growing education demand. The fact that satisfaction with the service makes a difference in a competitive market forces university to develop various aspects of service quality perceived by different stakeholders. In this study, the academic publications in which the perception of service quality offered by higher education institutions is measured are examined and preferred or designed scales in these publications are researched. In addition, the aforementioned studies are summarized and interpreted in terms of the dimensions taken into consideration in the evaluation of the service quality of higher education institutions and the samples in which the scales are applied. The aim of this study is to assist the studies to be done regarding the evaluation of the service quality of higher education institutions and to form a framework on what dimensions should not be ignored while evaluating the service quality of institutions.</p>

Alıntı / Cite

Kokoç, M., Ersöz, S., (2020). Yükseköğretim Kurumlarının Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesi İçin Kullanılan Ölçek ve Boyutların Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1290-1302.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Kokoç, 0000-0003-2035-9777
S. Ersöz, 0000-0002-7534-6837

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	24.04.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.12.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

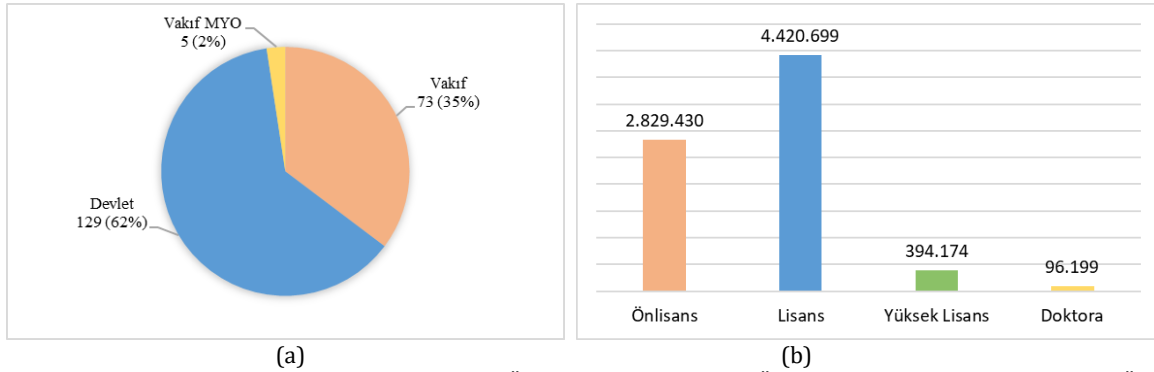
* İlgili yazar / Corresponding author: meldakokoc@gazi.edu.tr, +90-312-202-2000 /3882

1. Giriş (Introduction)

Hizmet kalitesi, işletmelerin başarısına etki eden kritik bir faktör olarak giderek daha fazla tanınmaktadır (Pakurár vd., 2019). Yapılan araştırmalar, hizmet kalitesinin, kurumun başarısını olumlu yönde etkilediğini, müşterilerin güven ve sadakatini etkileyerek rekabet avantajı yarattığını, hizmet kalitesi ile müşteri memnuniyeti arasında anlamlı pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir (Parasuraman vd., 1985; Sumaedi vd., 2012; Kumar ve Dash, 2014). Kaliteli bir hizmet, müşteri memnuniyetinin ve müşteri sadakatinin artmasını, servis sağlayıcı ve kullanıcı ile karşılıklı olarak faydalı bir ilişki kurmayı, hizmet başarısızlıkları için müşteri toleransının arttırmasını ve kurum hakkında olumlu sözlü reklamcılık yapılmasını sağlamaktadır (Rehaman ve Husnain, 2018).

Hizmet beklentisinin sektörel bazda değişkenlik göstermesi ve kalite algısının öznel olması, sunulan hizmet için kalitenin ölçümünü de tartışmalı bir konu haline getirmiştir. Bu tartışmalı konu **sağlık sektörü** (Buyukozkan vd., 2011; Buyukozkan ve Cıfci, 2012; Koyuncu, 2014; Tutar, 2018; Öztürk, 2018; Türkmen, 2018), **ulaşım ve nakliye sektörü** (Kunt, 2008; Çınar, 2010; Liou vd., 2011; Miranda vd., 2018; Devenci vd., 2018; Şeleci, 2018; Şimşek, 2018; Alsanosi, 2018), **ekonomi ve finans sektörü** (Lin, 2010), **bankacılık sektörü** (Kuzu, 2018; Tekeli, 2018; Güngör, 2018), **turizm sektörü** (Çevik, 2018; Yabacı, 2018; Bektash, 2018; Yüksel, 2018; Bütün, 2018; Çelik, 2018), **sigorta sektörü** (Gün, 2018; Üner, 2018), **enerji sektörü** (Senyücel, 2012) gibi çeşitli sektörler için yapılan çalışmalarda önemli bir yer edinmiştir. Diğer hizmet sektörlerinde olduğu gibi **eğitim sektöründe de** (Yılmaz vd., 2007; Voss vd., 2007; Okumuş ve Duygun, 2008; De Oliveira ve Ferreira, 2009; Rajab vd., 2011; Abari vd., 2011; Arokiasamy, 2012; Jiewanto vd., 2012) hizmet kalitesine verilen önemin ve bu konuda yapılan akademik çalışma sayısının da arttığı görülmektedir.

Eğitim sektörünün önemli bir parçası olan ve zaman geçtikçe sayıları artarak yaygınlaşan yükseköğretim kurumları, toplumun bilgi sağlayıcılarıdır. Türkiye'deki yükseköğretim sektöründeki hizmet sağlayıcılar, Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı'nın verilerine göre analiz edildiğinde Türkiye'de 2020 yılı itibarı ile 129 devlet üniversitesi, 73 vakıf üniversitesi ve 5 vakıf meslek yüksekokulu bulunduğu (Şekil 1.a), söz konusu kurumlarda 2.829.430 ön lisans, 4.420.699 lisans, 394.174 yüksek lisans ve 96.199 doktora öğrencisinin eğitim hizmeti aldığı görülmektedir (Şekil 1.b).



Şekil 1. Yükseköğretim Kurumlarının Tür Dağılımı ve Öğrenim Düzeyine Göre Öğrenci Sayısı ((a)Tür Dağılımı, (b) Öğrenim Düzeyine Göre Öğrenci Sayısı) (The Number of Students and Percentage Distribution of Type of Higher Education Institutions ((a)Percentage Distribution Of Type, (b) The Number of Students in Each Education Level) (Kaynak: <https://istatistik.yok.gov.tr/>)

Ülkemizde üniversite sayısının hızla artması, yurt dışındaki üniversitelerin Türk öğrencileri kabul şartlarının her geçen gün daha cazip hale getirilmesi, rekabetin artmasına neden olmuştur. Ayrıca üniversite mezunlarının iş bulamaması özellikle bazı fakültelerin ve üniversiteye olan talebin azalmasına neden olmuştur. Bir taraftan arzın artması diğer taraftan talebin azalması üniversitede eğitim almayı düşünen adayları kalite arayışına sürüklemiştir. Ulusal ve uluslararası yükseköğretim kurumları, artan rekabet koşullarından dolayı faaliyetlerindeki algılanan kaliteyi ve memnuniyeti arttırmak için baskı ile karşı karşıya kalmaktadırlar (Onditi ve Wechuli, 2017). Hizmet sağlayıcının başarısı ve rekabet avantajı hizmet kalitesine bağlı olduğu için kaliteli hizmet sunmak, rekabetin yüksek seviyeye ulaştığı günümüz koşullarında elzem duruma gelmiştir (Dlačić vd. 2014, Ersöz ve Aktepe, 2018). Rekabet ilk olarak ticari kavramları çağrışırsa da her sektörde ve alanda var olmakta olup eğitim alanında ulusal ve uluslararası boyutta önemli bir yer tutmaktadır.

Yükseköğretim kurumlarının var oldukları ülkelerin bugününe ve geleceğine en iyi şekilde katkıda bulunmaları sunacakları hizmet kalitesine bağlı olup, söz konusu hizmet kalitesinin de ayrıca bilimsel yöntemler ile ölçülmesi zaruri bir hale gelmiştir. Yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesi, kurumsal hedefler, pedagojik gereksinimler, küresel kaygılar, yerel bağlamlar, öğrencilerin niteliği, personelin yeterlilikleri, altyapı tesisleri ve yönetim gereksinimleri gibi birçok değişkene bağlıdır (Kaur ve Syal, 2015). Ancak, bilgi ve yeterlilikler gibi maddi

olmayan ürünlerin sunulduğu eğitim sektöründe hizmet kalitesini değerlendirmek için parametreleri doğru bir şekilde belirlemek önem arz etmektedir (Đurišová vd., 2015). Bu çalışma kapsamında, yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesinin değerlendirilmesini konu alan çalışmalar incelenerek hizmet kalitesinin ölçülmesinde kullanılan ölçekler ve bu ölçeklerde kullanılan boyutlar analiz edilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesi ölçümüne ilişkin çeşitli çalışmaların (Kitchroen, 2004; Arokiasamy, 2012; Welzant vd. 2015; Silva vd. 2017; Kundu, 2017; Onditi ve Wechuli, 2017; Prakash, 2018; Hasbullah ve Yusoff, 2018) mevcut olduğu görülmüştür. Ancak bu çalışmalarda temel amaç yükseköğretim endüstrisinde hizmet kalitesinin korunmasının önemini vurgulamak ya da belirli birkaç ölçek (SERVPERF, SERVQUAL, HEDPERF gibi) ile ilgili analiz yapmaktır. Bu çalışmaya benzer olan Onditi ve Wechulli (2017)'nin çalışmasında ise altı farklı ölçeğe ve birkaç ankete yer verilmiştir. Yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesinin değerlendirilmesi için geliştirilen ölçekleri derleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2. Hizmet Kalitesi: Tanımı ve Boyutları (Service Quality: Definition and Dimensions)

Literatürde hizmet kalitesi kavramına ilişkin kesin bir tanım olmamakla birlikte çeşitli yazarlar tarafından ifade edilen tanımlar mevcuttur. Hizmet kalitesini, Parasuraman vd. (1985), bir kuruluşun müşteri beklentilerini karşılama veya aşma kabiliyeti; Ersöz vd. (2009) bir hizmetin müşterilerin ihtiyaçlarını veya beklentilerini ne ölçüde karşıladığı; Rehman ve Husnain (2018) ise müşteri beklentisi ile hizmet deneyimi arasındaki algı farkı olarak tanımlamıştır.

Tanımlara bakıldığında hizmet kalitesi, hizmetin tüketicilerinin veya kullanıcılarının deneyimlerine göre hizmeti nasıl değerlendirdiklerine bağlıdır. Yani hizmet kalitesi, algılanan kaliteye dayanmaktadır. Algılanan hizmet kalitesi ise tüketicinin hizmeti almadan önceki beklentileri ile hizmeti aldığı anda yaşadığı deneyimini karşılaştırması ile belirlenmektedir. Bir kurum tarafından sunulan hizmet, müşteri beklentilerini aşarsa kaliteli olarak; ancak müşteri beklentilerini karşılayamazsa kalitesiz olarak değerlendirilmektedir (Zammuto vd., 1996).

Tablo 1. Hizmet Kalitesine Temel Oluşturan Çalışmaların Bazılarında Belirtilen Boyutlar (Dimensions Stated in Some of the Studies That Form Basis for Service Quality)

Sasser vd. (1978)	Parasuraman vd. (1985)	Parasuraman vd. (1988)	Stewart ve Walsh (1989)	Grönroos (1990)	Schvaneveldt vd. (1991)
Bütünlük (Completeness)	Fiziksel Özellikler (Tangibles)	Empati (Empathy)	Bilgi (Knowledge)	Esneklik (Flexibility)	Bütünlük (Completeness)
Durum (Condition)	Güvenilirlik (Reliability)	Fiziksel Özellikler (Tangibles)	Dakiklik (Timeliness)	Güvenilirlik (Reliability and trustworthiness)	Çevre (Environment)
Eğitim (Training)	Güvenlik (Security)	Güvence (Assurance)	Doğruluk (Accuracy)	Hizmet İyileştirme (Service Recovery)	Doğruluk (Accuracy)
Güvenlik (Security)	Heveslilik (Responsiveness)	Güvenilirlik (Reliability)	Güvenilirlik (Reliability)	Hizmet ortamı (Servicescape)	Duygu (Emotion)
Kullanılabilirlik (Availability)	İletişim (Communication)	Heveslilik (Responsiveness)	Güvenlik (Security)	İtibar (Reputation and credibility)	Heveslilik (Responsiveness)
Tutarlılık (Consistency)	İtibar (Credibility)		Hatasız (Mistake-free)	Profesyonellik ve beceri (Professionalism and skill)	Kullanım kolaylığı (Ease of use)
Tutum (Attitude)	Müşterileri anlama (Understanding the customers)		İhtiyaçları anlama (Understanding users' needs)	Tutum ve davranış (Attitudes and behavior)	Performans (Performance)
	Nezaket (Courtesy)		İletişim kurmaya istekli (Helpfulness in contact)	Ulaşılabilirlik (Accessibility)	
	Ulaşılabilirlik (Access)		İtibar (Credibility)		
	Yetkinlik (Competence)		Nezaket ve saygı (Courtesy and respect)		
			Ortam (Surroundings)		
			Seçenek kapasitesi (Capacity for choice)		
			Tazmin etmek (Redress)		
			Teknolojinin etkin kullanımı (Effective use of technology)		
			Ulaşılabilirlik (Ease of access)		
			Yetkinlik (Competence)		

Hizmet kalitesi, birden fazla boyuta dayanmakta (Parasuraman vd., 1985; Grönroos 1990) ve boyutlar sektörden sektöre farklılık göstermektedir (Brady ve Cronin, 2001). Sasser vd. (1978) güvenlik, tutarlılık, tutum, bütünlük, koşul, kullanılabilirlik ve hizmet sağlayıcıların eğitimi olmak üzere hizmet kalitesinin değerlendirilmesine ilişkin yedi boyuta vurgu yapmıştır. Lehtinen ve Lehtinen (1982) hizmet kalitesini interaktif, fiziksel ve kurumsal kaliteden oluşan üç boyutlu bir yapı olarak tanımlamıştır. Grönroos (1984), sunmuş olduğu ilk hizmet kalitesi modelinde hizmet kalitesi boyutlarını teknik kalite, fonksiyonel kalite ve kurumsal imaj olarak belirlemiştir. Literatürde en çok tanınan hizmet kalitesi boyutları Parasuraman vd. (1985) tarafından önerilmiştir. Fiziksel özellikler, güvenilirlik, güvenlik, heveslilik, iletişim, itibar, müşterileri anlama, nezaket, ulaşılabilirlik ve yetkinlikten oluşan on boyut daha sonra SERVQUAL ölçeğinde kullanılmak üzere beş boyuta (fiziksel özellikler, güvence, güvenilirlik, heveslilik, empati) indirgenmiştir (Parasuraman vd. (1988)). Bir kuruluşun sunduğu hizmet kalitesi için müşterilerin görüşlerine nasıl yanıt verdiği ve sorunları nasıl çözüldüğünün önem kriterler olduğunu belirten Stewart ve Walsh (1989) hizmet kalitesi için on altı (bilgi, dakiklik, doğruluk, güvenilirlik, güvenlik, hatasız, ihtiyaçları anlama, iletişim kurmaya istekli, itibar, nezaket ve saygı, ortam, seçenek kapasitesi, tazmin etmek, teknolojinin etkin kullanımı, ulaşılabilirlik, yetkinlik) boyut tanımlamıştır. Stewart ve Walsh (1989)'un çalışmasına benzer şekilde Grönroos (1990) hizmet iyileştirme boyutu ile sorunların çözülmesinin hizmet kalitesi algısında olumlu artış olduğunu belirtmiştir ve hizmet kalitesi için yedi boyut (esneklik, güvenilirlik, hizmet ortamı, hizmet iyileştirme, profesyonellik ve beceri, tutum ve davranış, ulaşılabilirlik) tanımlamıştır. Schvaneveldt vd. (1991) hizmet kalitesinin değerlendirilmesi için gizli faktörlerin nesnel (kalite özellikleri) ve öznel (memnuniyet seviyeleri) olduğu düşüncesine dayalı iki yönlü modelinde bütünlük, çevre, doğruluk, duygu, heveslilik, kullanım kolaylığı ve performans boyutlarını kullanmıştır. Hizmet kalitesinin değerlendirilmesine temel oluşturan söz konusu çalışmalarda tanımlanmış boyutlar Tablo 1'de sunulmuştur.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Yükseköğretim kurumlarının giderek yaygınlaşması, artan rekabetle birlikte katılımcı müşterilerin beklenti ve ihtiyaçlarını karşılamaya daha fazla dikkat edilmesini ve hizmet için kritik faktörlerin öğrenciler açısından belirlenmesini önemli hale getirmiştir. Bu çalışma ile yükseköğretim kurumlarında sunulan hizmet kalitesinin değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar incelenerek kullanılan veya geliştirilen ölçekler ile ölçeklerde yer alan boyutlar analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasının teorik çerçevesi Şekil 2'de sunulmuştur. İlk olarak aşağıda sunulan anahtar kelimeler ile veri tabanlarında arama yapılmış ve 132 yayın bir dosyada toplanmıştır.

(Measure OR Evaluate OR Assess) OR (Quality OR Service Quality) AND (Education OR Higher Education OR Higher Education Institution OR University)

(Measurement Tool OR Scale) AND (Education OR Higher Education OR Higher Education Institution OR University)

Dosyadaki yayınlar arasında birden fazla indirilmiş olanların tekrar dosyaları silinmiştir. Geriye kalan 119 yayın arasından tam metni görüntülenemeyen yayınlar silindikten sonra 103 yayın içerik açısından analiz edilmiştir. 103 yayının tam metni incelenmiş ve bu yayınlar arasında yükseköğretim kurumları dışında (ilkokul, lise veya özel kurslar gibi) verilen eğitime ilişkin değerlendirme yapılan çalışmalar ve herhangi bir hizmet kalitesi ölçeği kullanmayan çalışmalar elenmiştir. İçerik açısından uygun bulunan 72 yayın detaylı incelenerek elde edilen bilgiler görselleştirilerek yorumlanmıştır.



Şekil 2. Teorik Çerçeve (Theoretical Framework)

3.1. Yükseköğretim Kurumlarının Hizmet Kalitesi: Ölçekler ve Boyutlar (Service Quality of Higher Education Institutions: Scales and Dimensions)

Eğitimde kalite konusunda çok fazla çalışma yapılmasına rağmen yükseköğretimde hizmet kalitesinin nasıl ölçüleceği ve yorumlanacağı hakkında evrensel bir fikir birliği yoktur (Khan ve Ali, 2015). Bazı araştırmacılar, yükseköğretimde hizmet kalitesini değerlendirmek için genel olarak servis kalitesini ölçmek için tasarlanmış olan hizmet kalitesi modelini kullanmışlardır (Özgül ve Devebakan, 2005; Yılmaz vd., 2007; Talih, 2008; Çelik, 2010; Ong ve Nankervis, 2012; Yousapronpaiboon, 2014; Türkel, 2017; Datta ve Vardhan, 2017; Ayvaz, 2018; Savaş, 2018; Kandie, 2018; Gerşil ve Güven, 2018; Soni ve Govender, 2018). Bazı araştırmacılar ise eğitim sektörü yapısının diğer hizmet sektörlerine göre daha farklı olduğu düşüncesi ile yeni ölçekler geliştirmişlerdir (Kocapınar, 2002; Abdullah, 2006; Mahapatra ve Khan, 2007; Yıldız ve Kara, 2009; Sultan ve Wong, 2010; Saad, 2013; Icli ve Anıl, 2014; Kumar ve Dash, 2014; Pérez Rave ve Muñoz Giraldo, 2015; Hernández ve Ibarra, 2016; Gök, 2017; Özenir, 2018; Marimon vd., 2019; Abbas, 2020). Yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesinin değerlendirilmesi için yapılan çalışmalardan bazıları incelenerek kullanılan veya geliştirilen ölçekler Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Yükseköğretim Kurumlarının Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesinde Kullanılan Ölçeklerden Bazıları (Some of the Scales Used in the Evaluation of Service Quality of Higher Education Institutions)

Ölçek	Referans
ClassroomQual	Pérez Rave ve Muñoz Giraldo (2016)
EduQUAL	Mahapatra ve Khan (2007)
EduQUAL temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek	Khan ve Ali (2015), Kumaran ve Anbazhagan (2011), Narang (2012)
EFÖMÖ	Şahin (2009)
EFÖMÖ temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek	Olçay ve Ay (2019)
Farklı ölçeklerden yararlanılarak geliştirilmiş ölçek	Saad (2013)
HEdPERF	Abdullah (2005), Abdullah (2006), Ali vd. (2018)
HEdPERF temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek	Bektaş ve Akman (2013), Yavuz ve Gülmez (2016), Mulyono vd. (2020)
HEdQUAL	Icli ve Anıl (2014)
HEISQUAL	Abbas (2020)
HESES	Zhoc vd. (2018)
HESQUAL	Yılmaz (2019)
HiEdQUAL	Annamdevula ve Bellamkonda (2012)
INSTAQUAL	Kumar ve Dash (2014)
İtibar Yönetimi Ölçeği	Balay vd. (2017)
Öğrenci Memnuniyet Anketi	Şimşek vd. (2019)
PESPERF	Yıldız ve Kara (2009)
PHed	Sultan ve Wong (2010)
SERVPERF	Cronin ve Taylor (1992), Abdullah (2005), Aslantürk (2010), Kandie (2018), Soni ve Govender (2018)
SERVPERF temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek	Hossain vd. (2013), Maksüdünov vd. (2016), Ataman ve Adıgüzel (2019)
SERVQUAL	Parasuraman vd. (1988), Özgül ve Devebakan (2005), Yılmaz vd. (2007), Çelik (2010), Dursun (2011), Ong ve Nankervis (2012), Aytaç (2015), Datta ve Vardhan (2017), Türkel (2017), Ayvaz (2018), Gerşil ve Güven (2018), Devebakan vd. (2019), Ertuğrul ve Sarı (2019), Penpece-Demirer (2019), Lee ve Seong (2020)
SERVQUAL temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek	Bayrak (2007), Shekarchizadeh vd. (2011), Çerri (2012), Soğancı (2012), Calvo-Porrall vd. (2013), Hossain vd. (2013), Yüce (2013), Aygün (2014), Mahmoud ve Khalifa (2014), Yousapronpaiboon (2014), Zareinejad vd. (2014), Đonlagić ve Fazlić (2015), Chui vd. (2016), Galeeva (2016), Maksüdünov vd. (2016), Soba ve Şimşek (2016), Leonnard (2018), Ayaz ve Arakaya (2019), Kaya (2019), Alsheyadi ve Albalushi (2020).
SERVQUALITC	Hernández ve Ibarra (2016)
UE-SERVQUAL	Gök (2017)
UNIVQUAL	Marimon vd. (2019)
Yükseköğrenim Yaşam Doyumu Ölçeği	Erol ve Yıldırım (2016)
Yükseköğretim Yaşam Kalitesi Ölçeği	Demirdağ (2017)

Kullanılan ölçekler incelendiğinde yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesini ölçmek için en fazla Parasuraman vd. (1988) tarafından tanımlanan *SERVQUAL* (*SERVis QUALity*), *SERVQUAL* temel alınarak geliştirilmiş/uyarlanmış ölçekler, Cronin ve Taylor (1992) tarafından tanımlanan *SERVPERF* (*SERVice PERFormance*) ve *SERVPERF* temel alınarak geliştirilmiş/uyarlanmış ölçeklerin kullanıldığı görülmüştür (Tablo 2). *SERVQUAL* hizmet kalitesini, müşteri beklentileri ile algıları arasındaki fark olarak tanımlamaktadır (Parasuraman vd.,1988). *SERVQUAL* ölçeği, hizmet kalitesini değerlendirirken, fiziksel unsurlar, güvenilirlik, duyarlılık, yetkinlik ve empati olarak beş boyutu dikkate almaktadır. *SERVPERF* ise sadece algı bileşenine dayanan *SERVQUAL* ölçeğinin bir çeşididir. *SERVQUAL* ve *SERVPERF* ölçekleri ile ilgili detaylı bilgiye söz konusu iki yöntemi kıyaslamalı olarak açıklayan yayınlardan (Cronin ve Taylor, 1994; Jain ve Gupta, 2004; Carrillat vd., 2007; Bayraktaroglu ve Atrek, 2010; Rodrigues vd., 2011) ulaşılabilmektedir. *SERVQUAL* ve *SERVPERF* ölçekleri ile bu ölçekleri temel alarak geliştirilmiş bazı ölçeklerde kullanılan boyutlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. *SERVQUAL* ve *SERVPERF* ölçekleri temel alınarak geliştirilmiş ölçeklerden bazılarında kullanılan boyutlar
(Dimensions used in some of the scales developed based on *SERVQUAL* and *SERVPERF*)

<i>SERVQUAL</i> (Parasuraman vd.,1988)	<i>SERVPERF</i> (Cronin ve Taylor, 1992)	<i>SERVQUAL</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Kocapınar, 2002)
Fiziksel unsurlar	Güven	Fiziksel unsurlar
Güvenilirlik	Empati	Güvenilirlik
Duyarlılık/Empati	Cevap verebilirlik	Duyarlılık
Heveslilik /Yetkinlik	Güvenilirlik	Yetkinlik
Güven	Somut özellikler	Empati
		Ücret
<i>SERVQUAL</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Bayrak, 2007)	<i>SERVQUAL</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Shekarchizadeh vd., 2011)	<i>SERVQUAL</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Aygün, 2014)
Kampüs ve sosyalleşme imkânları	Profesyonellik	Görsellik ve itimat
Heveslilik	Güvenilirlik	Heveslilik
Temel ihtiyaçlar	Misafirperverlik	Kampüs ve sosyalleşme imkânı
Katkısal faaliyetler	Fiziksel özellikler	Katkısal faaliyet
Görsellik ve itimat	Özveri	Temel ihtiyaçlar
<i>SERVQUAL</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Zareinejad vd., 2014)	<i>SERVQUAL</i> ve <i>SERVPERF</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Maksüdünov vd., 2016)	<i>SERVPERF</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Ataman ve Adıgüzel, 2019)
Fiziksel özellikler	Heveslilik	Yönetim
İnsan faktörü	Güvenilirlik	Fiziki altyapı ve tesisler
Sistemik hizmet sağlama	Hijyen ve çevre temizliği	Öğretme-öğrenme süreci
Sosyal sorumluluk	Fiziksel imkânlar	Bilimsel ve sosyal etkinlikler
	Ulaşım kolaylığı	Öğretim elemanları
	Empati	Öğrenciler
<i>SERVQUAL</i> temel alınarak geliştirilmiş/ uyarlanmış ölçek (Kaya, 2019)		
Fiziksel özellikler		
Destek hizmetleri		
Uluslararasılaşma		
Akademik personel		
Akademik olmayan personel		

Genel olarak hizmet sağlayıcıların hizmet kalitesini ölçmek için geliştirilen ölçeklerin, yükseköğretim kurumlarındaki hizmet kalitesini değerlendirmede yetersiz olduğunu belirten çalışmalar yer almaktadır. Bu yazarlardan biri olan Abdullah (2006), yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla *HEdPERF* (*Higher Education PERFormance*) ölçeğini geliştirmiştir. *SERVPERF* ölçeği temel alınarak geliştirilen 41 ifadeli bu araç, yalnızca akademik bileşenleri değil, aynı zamanda öğrencinin zaman geçirdiği hizmet ortamının özelliklerini de göz önünde bulundurmaya amaçlamıştır. *HEdPERF* ölçeğinde, akademik yönler, akademik olmayan yönler, itibar, erişim, program konuları ve anlayış olmak üzere altı boyut ele alınmıştır. Annamdevula ve Bellamkonda (2012), yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesini ölçmek için öğretim ve ders içeriği, idari hizmetler, akademik tesisler, kampüs altyapısı ve destek hizmetleri olmak üzere 5 boyut ve 27 ifadeden oluşan *HiEdQUAL* (*Higher Education Service Quality*) ölçeğini önermiştir. Sultan ve Wong (2010), performans dayalı hizmet kalitesini ölçmek için *PHEd* (*Performance-based Higher Education*) ölçeğini tasarlamıştır. Marimon vd. (2019), öğrencinin kayıtlı olduğu bölümden bağımsız olarak yükseköğretim kurumuna ilişkin algısını değerlendirmek için *UnivQUAL* (*University QUALity*) ölçeğini geliştirmiştir. Söz konusu ölçekler, hizmet kalitesini üniversite düzeyinde (makro düzeyde) ölçmek için tasarlanmıştır. Ancak öğrencilerin eğitime ilişkin beklentileri, program düzeylerine (yüksek lisans, doktora) göre farklılık gösterebilmektedir. Eğitim kalitesini farklı program

düzeyleri ile değerlendirebilmek için Icli ve Anıl (2014), yüksek lisans programlarına özel *HEDQUAL (Higher Education Quality)* isimli ölçeği geliştirmiştir. Abbas (2020) öğrencilerin bakış açısıyla yüksek öğretimde hizmet kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla *HEISQUAL* ölçeğini geliştirmiştir.

Tablo 4. Yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesinin değerlendirilmesi için geliştirilen ölçeklerden bazılarında kullanılan boyutlar (Dimensions used in some of the scales developed to evaluate the service quality of higher education institutions)

HEdPERF (Abdullah, 2006)	PHed (Sultan ve Wong, 2010)	HiEdQUAL (Annamdevula ve Bellamkonda, 2012)
Akademik yönler	Güvenilirlik	Öğretim ve ders içeriği
Akademik olmayan yönler	Etkinlik	İdari hizmetler
İtibar	Yetenek	Akademik tesisler
Erişim	Verimlilik	Kampüs altyapısı
Program konuları	Yeterlilikler	Destek hizmetleri
Anlayış	Güvence	
	Olağandışı durum yönetimi	
	Dönem ve ders izlencesi	
HEdQUAL (Icli ve Anıl, 2014)	HESES (Zhoc vd., 2018))	HESQUAL (Yılmaz, 2019)
Akademik kalite	Akademik katılım	İdari yönetim kalitesi
İdari hizmet kalitesi	Bilişsel katılım	Fiziki olanakların kalitesi
Kütüphane hizmet kalitesi	Öğretmenlerle sosyal etkileşim	Eğitim kalitesi
Kariyer olanakları sağlama kalitesi	Yaşlıları ile sosyal etkileşim	Destek hizmetlerinin kalitesi
Destek hizmetlerinin kalitesi	Duygusal etkileşim	Dönüştürücü nitelik
UNIVQUAL (Marimon vd. 2019)		HEISQUAL (Abbas, 2020)
Müfredat		Öğretmenlerin profili
Beceri geliştirme		Müfredat
Hizmet ve olanaklar		Altyapı ve tesisler
		Yönetim ve destek personeli
		İstihdam kalitesi
		Emniyet ve güvenlik
		Öğrencilerin beceri gelişimi

Yükseköğretim kurumlarındaki hizmet kalitesine yönelik algı, program düzeylerine göre değişkenlik gösterebileceği gibi bölümlere göre de farklılaşabileceği için bölüm bazında değerlendirme yapabilmek için Mahapatra ve Khan (2006), teknik eğitimde hizmet kalitesini değerlendirmek için öğrenim çıktıları, yanıt verebilirlik, fiziksel özellikler, kişilik gelişimi ve akademisyenler olmak üzere beş boyuttan oluşan *EDUQUAL (EDUCATION QUALITY)*; Yıldız ve Kara (2009), beden eğitimi ve spor bilimleri yüksekokulundaki hizmet kalitesini ölçmek için *PESPERF (Physical Education and Sports Sciences PERFORMANCE)*; Şahin (2009) eğitim fakültesinde eğitim alan öğrencilerin aldıkları hizmete ilişkin memnuniyet düzeylerini ölçmek için *EFÖMÖ (Eğitim Fakültesi Öğrenci Memnuniyet Ölçeği)*; Hernández ve Ibarra (2016) teknoloji enstitüsü öğrencileri tarafından algılanan hizmet kalitesini değerlendirmek için *SERQUALITC* isimli ölçekleri geliştirmişlerdir.

Tablo 5. Yükseköğretim Kurumlarında Bölüm Bazında Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesi için Geliştirilen Ölçeklerde Kullanılan Boyutlar (The Dimensions Used in the Scales Developed For the Evaluation of Quality Of Service On the Basis Of Departments in Higher Education Institutions)

EduQUAL (Mahapatra ve Khan, 2007)	EFÖMÖ (Şahin, 2009)
Akademik personel	Öğretim elemanları
Duyarlılık	Danışmanlık
Fiziksel unsurlar	Yönetim
Kişisel gelişim	Kaynaklar
Öğrenim çıktıları	Bilgisayar olanakları
	Dersler ve ders programları
PESPERF (Yıldız ve Kara, 2009)	SERVQUALITC (Hernández ve Ibarra, 2016)
Akademik hizmet	Güvenilirlik
Empati	Cevaplayıcı kapasitesi
Erişilebilirlik	Güvenlik
	Empati
	Fiziksel özellikler

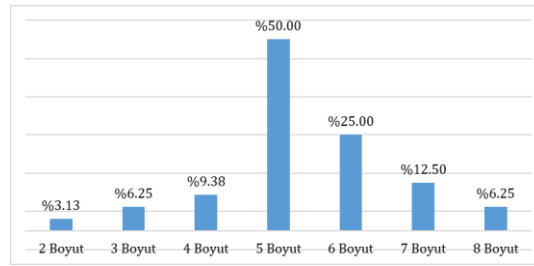
Bu ölçeklere ek olarak Balay vd. (2017), yükseköğretim kurumları bünyesindeki akademik personel, idari personel ve öğrencilerin kurumsal itibar algılarının belirlenmesi için kurumsal varlıkların kullanımı, yenilikçilik, yönetim kalitesi, çalışanların insan ilişkileri yeteneği, çalışanların kurumsal performans yeteneği, finansal sağlamlık ve

yatırım değeri, ürün ve hizmet kalitesi, sosyal sorumluluk boyutlarından oluşan *İtibar Yönetimi Ölçeğini* geliştirmiştir. Hizmet kalitesinin, hizmetin sunulduğu ortamın fiziksel koşullarına da bağlı olduğu düşüncesi ile Pérez Rave ve Muñoz Giraldo (2016) yükseköğretim kurumunun dersliklerini, öğrenci perspektifinden değerlendirmek için heveslilik, oyalanma (sıra arama), girişim, teknolojik araçların durumu, sıraların durumu, sınıf tahtasının durumu, teknolojik araçların güvenilirliği boyutlarını içeren *ClassroomQual (Classroom Quality)* ölçeğini tasarlamıştır.

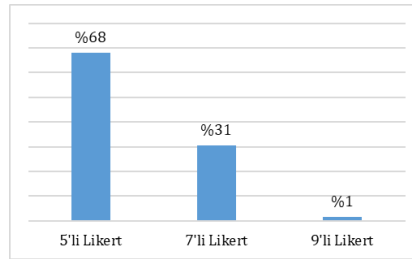
Tablo 6. Yükseköğretim kurumlarında özel amaçlar için hizmet kalitesinin değerlendirilmesine yönelik geliştirilen ölçeklerde kullanılan boyutlar (Dimensions used in the scales developed for the evaluation of service quality for special purposes in higher education institutions)

İtibar Yönetimi Ölçeği (Balay vd., 2017)	ClassroomQual (Pérez Rave ve Muñoz Giraldo, 2016)
Kurumsal varlıkların kullanımı	Bilişim-teknoloji olanakları hizmeti
Yenilikçilik	Girişim
Yönetim kalitesi	Heveslilik
Çalışanların insan ilişkileri yeteneği	Oyalanma (sınıfta)
Çalışanların kurumsal performans yeteneği	Sınıf tahtasının durumu
Finansal sağlamlık ve yatırım değeri	Sıraların durumu
Ürün ve hizmet kalitesi	
Sosyal sorumluluk	

Söz konusu ölçeklerde kullanılan boyut sayıları analiz edildiğinde ölçeklerin çoğunluğunun 5 boyutlu olarak tasarlandığı görülmektedir (Şekil 3). Ek olarak söz konusu ölçeklerin uygulanmasında tercih edilen likert sayıları incelendiğinde ise en fazla 5'li en az ise 9'lu likert tipinin seçildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4).

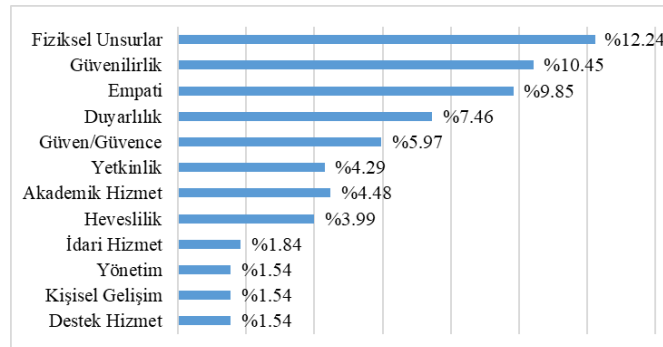


Şekil 3. Boyut Sayısı Dağılımı (Dimension Number Distribution)

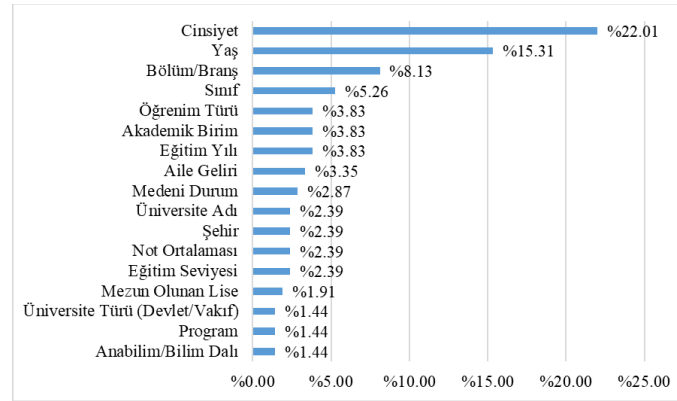


Şekil 4. Likert Tercih Dağılımı (Likert Preference Distribution)

Ölçeklerde kullanılan boyutlar arasında en fazla tercih edilenlerin fiziksel unsurlar, güvenilirlik, empati, duyarlılık, güven, akademik hizmet, yetkinlik ve heveslilik olduğu belirlenmiştir (Şekil 5). Ayrıca, bu ölçeklere ek olarak sorulan demografik özellikler arasından en fazla cinsiyet, yaş, bölüm ve sınıf bilgilerinin talep edildiği görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 5. Boyut Frekansı (Dimension Frequency)



Şekil 6. Demografik Özellik Frekansı (Demographic Feature Frequency)

3.2. Yükseköğretim Kurumlarının Hizmet Kalitesi: Müşteri Seçimi (Service Quality of Higher Education Institutions: Customer Selection)

Hizmetin kalitesi, hizmetin sunulduğu tarafın değerlendirdiği bir olgu olduğu için müşterinin tanımlanması ve bu müşterilerin hizmet kalitesine yönelik taleplerinin dikkate alınması diğer önemli faktörlerden biridir. Yükseköğretim sektörü, işveren, öğrenci, akademik personel, hükümet ve aileler gibi çeşitli müşteri gruplarının farklı gereksinimlere hizmet sunmaktadır (Abdullah, 2006; Iclı ve Anıl, 2014). Araştırmacılar tarafından yükseköğretim kurumu müşterileri, farklı kategorilere (öğrenciler, mezunlar, işverenler, akreditasyon kuruluşları, öğretim üyeleri vb.) ayrılmıştır. Ancak, araştırmacıların hemfikir olduğu konu yükseköğretim kurumlarının birincil müşterilerinin öğrenciler olduğudur (Kumar ve Dash, 2014; Ğurišová vd., 2015; Dicker vd., 2019).

Onditi ve Wechuli (2017)'ye göre öğrenci, rekabet avantajının en önemli kaynağıdır ve öğrenci memnuniyeti, öğrencilerin ilgisini çekmeye, devam ettirmeye ve memnun öğrenciler tarafından olumlu görüşlerin yayılmasına yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen çalışmaların çoğu bu görüşü destekler nitelikte hizmet kalitesini değerlendirirken öğrencilerin görüşlerinden yararlanmışlardır. Öğrencilerin görüşlerinin yanı sıra Mahapatra ve Khan (2007) öğrencilerin ebeveynlerinin ve kurumdaki personellerin, Balay vd. (2017) ise akademik ve idari personelin görüşlerinden de yararlanmışlardır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Eğitim kalitesini artırmanın, sürekli gelişim için çaba harcamaya, paydaş çıkarlarına odaklanmaya ve öğrenci memnuniyetini yükseltmeye bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda, yükseköğretim kurumlarının sunduğu hizmete ilişkin memnuniyeti arttırmak için müşterilerin hizmete ilişkin beklentilerinin ve algılarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Söz konusu değerlendirme, çalışmanın amacına ve hedef müşterilere bağlı olarak değişkenlik göstereceği için analiz edilmek istenen hizmet boyutlarına göre farklı ölçek türleri kullanılmalı, uyarlanmalı veya tasarlanmalıdır.

Günümüzde 200'ü aşkın yükseköğretim kurumu arasındaki yoğun rekabet ortamında ayakta kalabilmek, ulusal veya uluslararası tanınırlığı arttırmak ve müşterilerin memnun olacağı kaliteli hizmeti sunabilmek için hizmet kalitesinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmenin sonucuna göre hizmet kalitesine ilişkin beklenti açığı bulunan boyut veya alt boyutlar için iyileştirme çalışmaları yapılarak müşteri memnuniyetinin artırılması hedeflenmelidir.

Bu çalışmada, yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesini farklı bakış açıları ile değerlendiren çalışmalar analiz edilerek kullanılan ölçekler ve dikkate alınan boyutlar araştırılmıştır. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda, hizmet kalitesinin ölçülmesi için geliştirilen SERVQUAL ve SERVPERF ölçeklerinin yükseköğretim kurumlarında hizmet kalitesinin ölçülmesi için de kullanıldığı görülmüştür. Bu ölçeklere ek olarak, kalitesi ölçülmek istenen farklı birimlere veya hizmetlere yönelik farklı boyutlar kullanılarak çeşitli ölçekler tasarlanmıştır. Benzer konularda yapılacak olan çalışmalara literatür desteği sağlanması ve ölçek ve/veya boyut seçim sürecinde yardımcı olması için ölçeklere ve boyutlara ilişkin özet tablolar hazırlanarak sunulmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abari, A. A. F., Yarmohammadian, M.H., Esteki, M., 2011. Assessment of quality of education a non-governmental university via SERVQUAL model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 15, 2299-2304.
- Abbas, J., 2020. HEISQUAL: A modern approach to measure service quality in higher education institutions. *Studies in Educational Evaluation*, 67, 1-11.
- Abdullah, F., 2005. HEDPERF versus SERVPERF: The quest for ideal measuring instrument of service quality in higher education sector. *Quality Assurance in education*, 13(4), 305-328.
- Abdullah, F., 2006. The development of HEDPERF: a new measuring instrument of service quality for the higher education sector. *International Journal of Consumer Studies*, 30(6), 569-581.
- Ali, S. R. O., Shariff, N. A. M., Said, N. S. M., Mat, K. A., 2018. Service Quality in Higher Education In Malaysia: Perception Of Undergraduate Students In A Malaysian Public University. *e-Academia Journal*, 7(2), 138-145.
- Alsanosı, F. M., 2018. Airline Operation Performance: The Relation With Distinctive Service and Quality of Service. Master Thesis. The University of Turkish Aeronautical Association, Turkey.
- Alsheyadi, A. K., Albalushi, J., 2020) Service quality of student services and student satisfaction: the mediating effect of cross-functional collaboration. *The TQM Journal*, 1-19.
- Annamdevula, S., Bellamkonda, R., 2012. Development of HiEdQUAL for measuring service quality in Indian higher education sector. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 3(4), 412-416.
- Arokiasamy, A. R. A., 2012. Literature review: service quality in higher education institutions in Malaysia. *Contemporary Business Studies*, 3(4), 227-44.
- Aslantürk, Y., 2010. Yükseköğretim Düzeyinde Turist Rehberliği Eğitimi Veren Öğretim Kurumlarında Uygulanan Eğitime Yönelik Öğrenci Algılamaları. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ataman, O., Adıgüzel, A., 2019. Yükseköğretimde Kalite Algısı: Düzce Üniversitesi Örneği. *Electronic Journal of Education Sciences*, 8(15), 39-56.
- Ayaz, N., Arakaya, A., 2019. Yükseköğretimde Hizmet Kalitesi Ölçümü: Öğrenci İşleri Daire Başkanlığı Örneği. *Journal of Higher Education & Science/Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 9(1), 123-133.
- Aygün, M. S., 2014. Hizmet Kalitesinin Öğrenci Memnuniyeti Üzerindeki Etkisi: Bitlis Eren Üniversitesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- Aytaç, A. İ., 2015. Hizmet Kalitesinin Servqual Modeli ile Ölçülmesi ve Eğitim Sektöründe Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ayvaz, Ü., 2018. Uzaktan Eğitimde Algılanan Hizmet Kalitesinin Tatmin ve Tercih Üzerine Etkisinin Yapısal Eşitlik Modellemesi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Balay, R., Kaya, A., Yıldırım, M., 2017. Yükseköğretim Kurumlarında İtibar Yönetimi Ölçeğinin Geliştirilmesi. *Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi (KEFAD)*, 18(3), 645-667.
- Bayrak, B., 2007. Yükseköğretim Kurumlarından Beklenen Hizmet Kalitesi Ve Hizmet Kalitesinin Algılanmasına Yönelik Bir Araştırma. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Bayraktaroglu, G., Atrek, B., 2010. Testing the Superiority and Dimensionality of SERVQUAL vs. SERVPERF in Higher Education. *Quality Management Journal*, 17(1), 47-59.
- Bektaş, E., 2018. Turizm Şirketlerinin Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesi: Trabzon İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Bektaş, H., Akman, S., U., 2013. Yükseköğretimde hizmet kalitesi ölççeği: güvenilirlik ve geçerlilik analizi. *Ekonometri ve İstatistik e-Dergisi*, (18), 116-133.
- Brady, M. K., Cronin Jr. J. J., 2001. Some new thoughts on conceptualizing perceived service quality: a hierarchical approach. *Journal of marketing*, 65(3), 34-49.
- Bütün, S., 2018. Termal Otel İşletmelerinde Hizmet Kalitesinin SERVQUAL Modeli ile Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Büyükközkın, G., Çifçi, G., 2012. A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. *Expert systems with applications*, 39(3), 2341-2354.
- Büyükközkın, G., Çifçi, G., Gülerüz, S., 2011. Strategic analysis of healthcare service quality using fuzzy AHP methodology. *Expert systems with applications*, 38(8), 9407-9424.
- Calvo-Porrall, C., Lévy-Mangin, J., P., Novo-Corti, I., 2013. Perceived quality in higher education: an empirical study. *Marketing Intelligence & Planning*, 31(6), 601-619.
- Carrillat, F. A., Jaramillo, F., Mulki, J., P., 2007. The validity of the SERVQUAL and SERVPERF scales: A meta-analytic view of 17 years of research across five continents. *International Journal of Service Industry Management*, 18(5), 472-490.
- Chui, T. B., bin Ahmad, M. S., 2016. Evaluation of service quality of private higher education using service improvement matrix. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 224, 132-140.
- Cronin Jr, J. J., Taylor, S. A., 1994. SERVPERF versus SERVQUAL: reconciling performance-based and perceptions-minus-expectations measurement of service quality. *Journal of marketing*, 58(1), 125-131.
- Cronin Jr, J. J., Taylor, S. A., 1992. Measuring service quality: a reexamination and extension. *Journal of marketing*, 56(3), 55-68.
- Çelik, İ., 2010. Yüksek Öğretimde Hizmet Kalite Algısının Ölçümü: Yüksek Lisans Öğrencileri Üzerinde Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Çelik, Ö. K., 2018. Butik Otellerde Sunulan Hizmet Kalitesinin Servqual Yöntemi ile Ölçülmesi: Ege Bölgesi'nde Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Çerri, S., 2012. Assessing the quality of higher education services using a modified SERVQUAL scale. *Annales Universitatis Apulensis-Series Oeconomica*, 14(2), 664-679.
- Çevik, S., 2018. Termal Turizm İşletmelerinde Hizmet Kalitesinin Ölçülmesi: Güneydoğu Anadolu Bölgesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Batman Üniversitesi, Batman.
- Çınar, E., 2010. Hava Trafik Kontrol Hizmetlerinde Algılanan Hizmet Kalitesi. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

- Datta, K. S., Vardhan, J., 2017. A SERVQUAL-based framework for assessing quality of international branch campuses in UAE: A management students' perspective. *SAGE Open*, 7(1), 1-9.
- De Oliveira, O. J., Ferreira, E. C., 2009. Adaptation and application of the SERVQUAL scale in higher education. In *Proceedings of POMS 20th Annual Conference Orlando, Florida USA*.
- Demirdağ, S., 2017. Yükseköğretim Yaşam Kalitesi Ölçeğinin Geliştirilmesi ve Psikometrik Özelliklerinin Araştırılması. *Asya Öğretim Dergisi*, 5(2), 19-31.
- Devebakan, N., Egelı, H. A., Koçak, N. (2019). Yükseköğretim Kurumlarında Öğrenci Beklenti ve Algılamaları Temelinde Hizmet Kalitesinin SERVQUAL Ölçeği ile Değerlendirilmesi: Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Meslek Yüksekokulu'nda Bir Araştırma. *Yükseköğretim Dergisi*, 9(2), 201-212.
- Deveci, M., Özcan, E., John, R., Öner, S. C., 2018. Interval type-2 hesitant fuzzy set method for improving the service quality of domestic airlines in Turkey. *Journal of Air Transport Management*, 69, 83-98.
- Dicker, R., Garcia, M., Kelly, A., Mulrooney, H., 2019. What does 'quality' in higher education mean? Perceptions of staff, students and employers. *Studies in Higher Education*, 44(8), 1425-1441.
- Dlačić, J., Arslanagić, M., Kadić-Maglajlić, S., Marković, S., Raspor, S., 2014. Exploring perceived service quality, perceived value, and repurchase intention in higher education using structural equation modelling. *Total Quality Management & Business Excellence*, 25(1-2), 141-157.
- Donlagić, S., Fazlić, S., 2015. Quality assessment in higher education using the SERVQUALQ model. *Management: journal of contemporary management issues*, 20(1), 39-57.
- Đurišová, M., Kucharčíková, A., Tokarčíková, E., 2015. Assessment of higher education teaching outcomes (Quality of higher education). *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 174, 2497-2502.
- Dursun, T., 2011. Uzaktan Eğitimde Hizmet Kalitesinin Ölçülmesi ve Eğitim Sektöründe Bir Uygulama. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Erol, M., Yıldırım, İ., 2016. The development of higher education life satisfaction scale/Yükseköğrenim yaşam doyumu ölçeğinin geliştirilmesi. *Eğitimde Kuram ve Uygulama*, 12(1), 221-243.
- Ersöz, S., Aktepe, A., 2018. Hizmet/Servis Sistemleri. Seçkin Yayıncılık.
- Ersöz, S., Pınarbaşı, M., Türker, A. K., Yüzükırmızı, M., 2009. Hizmet Kalitesinin Servqual Metodu ile Ölçümü ve Sonuçların Yapısal Eşitlik Modelleri ile Analizi: Öğretmen Evi Uygulaması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 1(1), 19-27.
- Ertuğrul, İ., Sarı, G., 2019. Hizmet Kalitesi Ölçümünde Servqual Tekniği: Bir Üniversite Uygulaması. *Organizasyon Ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 11(1), 21-35.
- Galeeva, R. B., 2016. SERVQUAL application and adaptation for educational service quality assessments in Russian higher education. *Quality Assurance in Education*, 24(3), 329-348.
- Gerşil, M., Güven, H., 2018. Üniversitelerde Hizmet Kalitesinin Servqual Analizi ile Ölçülmesi: Celal Bayar Üniversite'nde Bir Uygulama. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(1), 111-125.
- Gök, B., 2017. Üniversitelerde Uzaktan Eğitim Programlarının Hizmet Kalitesi ve Etkinliğinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Grönroos, C. (1990). Service management and marketing: Managing the moments of truth in service competition. *Jossey-Bass*.
- Grönroos, C., 1984. A service quality model and its marketing implications. *European Journal of Marketing*, 18(4), 36-44.
- Gün, Ö., 2018. Hizmet Kalitesinin Müşteri Memnuniyeti ve Müşteri Sadakati ile İlişkisinin Sigorta Sektöründe İncelenmesi; Gaziantep'te Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Güngör, M., Y., 2018. Kamusal Sermayeli Katılım Bankalarının Bankacılık Sektörü İçerisindeki Yeri ve Kamu Katılım Bankalarında Hizmet Kalitesinin Ölçülmesine Yönelik Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Hasbullah, A. and Yusoff, W. Z. W., 2018. Quality of Service in Public Higher Education Institution (HEI) Facilities: A Critical Literature Review. *International Journal of Innovation and Business Strategy (IJIBS)*, 9(1), 64-68.
- Hernández, J. G. V., Ibarra, S. T. C., 2016. Evaluating Higher Education Institutions through Agency and Resources-Capabilities Theories. A Model for Measuring the Perceived Quality of Service. *Independent Journal of Management & Production*, 7(4), 1126-1153.
- Hossain, M. J., Islam, M. A., Saadi, M. S., 2013. Evaluating user's experience of service performance using SERVPERF scale: A case study of some private university libraries in Bangladesh. *Annals of Library and Information Studies (ALIS)*, 60(4), 249-259. <https://istatistik.yok.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 15.01.2020
- Icli, G. E., Anil, N. K., 2014. The HEDQUAL scale: A new measurement scale of service quality for MBA programs in higher education. *South African Journal of Business Management*, 45(3), 31-43.
- Jain, S. K., Gupta, G., 2004. Measuring service quality: SERVQUAL vs. SERVPERF scales. *Vikalpa*, 29(2), 25-38.
- Jiewanto, A., Laurens, C., Nelloh, L., 2012. Influence of service quality, university image, and student satisfaction toward WOM intention: A case study on Universitas Pelita Harapan Surabaya. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 40, 16-23.
- Kandie, H. K., 2018. Effects of Service Quality on Students' Satisfaction in Libraries in Kenya Using Servperf Model: Case of St Pauls' University in Kenya. *Archives of Business Research*, 6(1), 117-133.
- Kaur, G., Syal, A., 2015. Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Higher Education. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, 4(3), 254-263.
- Kaya, K., 2019. Harran Üniversitesi Öğrencilerinin Hizmet Kalitesi Algısındaki Farklılıklar. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 10(2), 268-279.
- Khan, M., K., Ali, A., 2015. Quality Of Education in Higher Educational Institutions: A Comparative Study Of Perceptions And Expectations Of Business Students. *Journal of Quality and Technology Management*, 11(2), 137 - 162.
- Kitchroen, K., 2004. Literature review: Service quality in educational institutions. *ABAC journal*, 24(2), 14-25.
- Kocapınar, E., B., 2002. Yüksek Öğretimde Hizmet Kalitesi Ölçümü: Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Koyuncu, A., G., 2014. Hastanelerde Hizmet Kalitesi Algısı: Doktor ve Hemşireler ile Yapılan Bir Çalışma. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara.

- Kumar, S., Dash, M. K., 2014. The INSTAQUAL scale: an instrument for measuring service quality of management institutions. *International Journal of Services, Economics and Management*, 6(4), 377.
- Kumaran, P. S., Anbazhagan, B., 2011. A Study on Quality in Higher Education: Student's Perspective. *Journal for Bloomers of Research*, 3(2), 222-226.
- Kundu, G. K., 2017. Quality in Higher Education From Different Perspectives: A Literature Review. *International Journal for Quality Research*, 11(1), 17-34.
- Kunt, Y. E., 2008. Hava Yolu Yolcu Taşımacılığında Sık Uçan Yolcu Programı Üyeliği ile Hizmet Kalitesindeki Tolerans Bölgesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi ve Bir Uygulama. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Kuzu, B., 2018. The Effect of Service Quality on Customer Satisfaction in Mobile Banking. Master Thesis. Doğuş University, Institute of Social Sciences. İstanbul.
- Lee, H. J., Seong, M. H., 2020. A Study on the Effects of Business Service Quality on Satisfaction, Commitment, Performance, and Loyalty at a Private University. *The Journal of Asian Finance, Economics, and Business*, 7(9), 439-453.
- Lehtinen, J.R., Lehtinen, U., 1982. Service quality: a study of quality dimensions, unpublished Working Paper, Service Management Institute, Helsinki.
- Leonard, 2018. The performance of servqual to measure service quality in private university. *Journal on Efficiency and Responsibility in Education and Science*, 11(1), 16-21.
- Lin, H. T., 2010. Fuzzy application in service quality analysis: An empirical study. *Expert systems with Applications*, 37(1), 517-526.
- Liou, J. J., Hsu, C. C., Yeh, W. C., Lin, R. H., 2011. Using a modified grey relation method for improving airline service quality. *Tourism management*, 32(6), 1381-1388.
- Mahapatra, S. S., Khan, M. S., 2007. A neural network approach for assessing quality in technical education: an empirical study. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 2(3), 287-306.
- Mahmoud, A. B., Khalifa, B., 2014. A confirmatory factor analysis for SERVPERF instrument based on a sample of students from Syrian universities. *Education+ Training*, 57(3), 343-359.
- Maksüdünov, A., Çavuş, Ş., Eleren, A., 2016. Yükseköğretimde Öğrencilerin Hizmet Kalitesine Yönelik Algılamaları. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(4), 65-76.
- Marimon, F., Mas-Machuca, M., Berbegal-Mirabent, J., Llach, J., 2019. UnivQual: a holistic scale to assess student perceptions of service quality at universities. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30(1-2), 184-200.
- Miranda, S., Tavares, P., Queiró, R., 2018. Perceived service quality and customer satisfaction: A fuzzy set QCA approach in the railway sector. *Journal of Business Research*, 89, 371-377.
- Mulyono, H., Hadian, A., Purba, N., Pramono, R., 2020. Effect of Service Quality Toward Student Satisfaction and Loyalty in Higher Education. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business (JAFEB)*, 7(10), 929-938.
- Narang, R., 2012. How do management students perceive the quality of education in public institutions?. *Quality Assurance in Education*, 20(4), 357-371.
- Okumuş, A., Duygun, A., 2008. Service quality measurement on education service marketing and relationship between perceived service quality and student satisfaction. *Anadolu university journal of social science*, 8(2), 17.
- Olçay, A., Ay, E., 2019. Turizm ve Otelcilik Meslek Yüksekokullarında Öğrenim Gören Öğrencilerin Eğitim-Öğretim Hizmet Kalitesine İlişkin Görüşlerinin Belirlenmesi (Türkiye Örneği). *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 27(2), 453-466.
- Onditi, E. O., Wechuli, T. W., 2017. Service quality and student satisfaction in higher education institutions: A review of literature. *International journal of scientific and research publications*, 7(7), 328-335.
- Ong, W. M., Nankervis, A., 2012. Service quality in higher education: Students' perceptions in Australia and Malaysia. *Review of Integrative Business and Economics Research*, 1(1), 275.
- Özenir, Ö., Avcı, E., Coşkuntuncel, O., 2018. Sınıf Öğretmenlerinin Matematik Dersi Etkinlikleri Hazırlama Yeterliklerini Belirlemeye Yönelik Ölçek Geliştirme Çalışması. *Ihlara Eğitim Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 155-165.
- Özgül, E., Devecan, N., 2005. Üniversitelerde Servqual tekniği ile algılanan hizmet kalitesinin ölçülmesine yönelik karşılaştırmalı bir araştırma. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 3(2), 93-116.
- Öztürk, İ., 2018. Yatan Hastalarda Beklenen ve Algılanan Hizmet Kalitesinin Servqual Ölçeği İle Değerlendirilmesi: Haydarpaşa Numune Hastanesi Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Pakurár, M., Haddad, H., Nagy, J., Popp, J., Oláh, J., 2019. The Service Quality Dimensions that Affect Customer Satisfaction in the Jordanian Banking Sector. *Sustainability*, 11(4), 1113.
- Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., Berry, L. L., 1985. A conceptual model of service quality and its implications for future research. *Journal of marketing*, 49(4), 41-50.
- Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., Berry, L. L., 1988. Servqual: A multiple-item scale for measuring consumer perc. *Journal of retailing*, 64(1), 12.
- Penpece-Demirer, D., 2019. Service Quality, Students' Satisfaction and Supportive Attitude in the Higher Education Institutions: Evidence from an Emerging Market. *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 10(17), 308-331.
- Pérez Rave, J., Muñoz Giraldo, L., 2016. ClassroomQual: a scale for measuring the use-of-classrooms-for-teaching-learning service quality. *Total Quality Management & Business Excellence*, 27(9-10), 1063-1090.
- Prakash, G., 2018. Quality in higher education institutions: insights from the literature. *The TQM Journal*, 30(6), 732-748.
- Rajab, A., Panatik, S. A., Rahman, A., Rahman, H. A., Shaari, R., Saat, M., 2011. Service Quality in a Research University: A Post-Graduate Perspective. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 29, 1830-1838.
- Rehaman B. and Husnain M., 2018. The Impact of Service Quality Dimensions on Patient Satisfaction in the Private Healthcare Industry in Pakistan. *Journal of Hospital & Medical Management*, 1(4:1), 1-8.
- Rodrigues, L. L., Barkur, G., Varambally, K. V. M., Golrooy Motlagh, F., 2011. Comparison of SERVQUAL and SERVPERF metrics: an empirical study. *The TQM Journal*, 23(6), 629-643.
- Saad, N., 2013. Students' Perceptions of Higher Education Quality At Notre Dame University-Louaize in Lebanon. Doctorate Thesis. Saint Louis University.
- Sasser, W. E., Olsen, R. P., Wyckoff, D. D., 1978. Management of service operations: Text, cases, and readings. Allyn & Bacon.

- Savaş, F., 2018. Ortaöğretim Mesleki Eğitimi Muhasebe ve Finansman Alanında İşletmelerde Beceri Eğitimi Uygulamalarının Hizmet Kalitesi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Schvaneveldt, S. J., Enkawa, T., Miyakawa, M., 1991. Consumer evaluation perspectives of service quality: evaluation factors and two-way model of quality. *Total quality management*, 2(2), 149-162.
- Senyücel, O., 2012. Türkiye’de Elektrik Dağıtımında Hizmet Kalitesi ve Etkinlik Ölçümü. Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Shekarchizadeh, A., Rasli, A., Hon-Tat, H., 2011. SERVQUAL in Malaysian universities: perspectives of international students. *Business Process Management Journal*, 17(1), 67-81.
- Silva, D. S., de Moraes, G. H. S. M., Makiya, I. K. and Cesar, F. I. G., 2017. Measurement of perceived -service quality in higher education institutions. *Quality Assurance in Education*, 25(4), 415-439.
- Soba M., Şimşek, A., 2016. Üniversite Öğrencilerinin Öğretim Elemanlarından Kalite Beklentileri: Bir Alan Araştırması. *ISGUC The Journal of Industrial Relations and Human Resources*, 18(1), 116-138.
- Soğancı, E., 2012. SERVQUAL ile Beklenti ve Algının Birlikte Ölçümüne Yönelik Eğitim Sektöründe Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Soni, S., Govender, K., 2018. The Relationship between Service Quality Dimensions and Brand Equity: Higher Education Students’ Perceptions. *Journal of Management and Business Administration. Central Europe*, 26(3), 71-87.
- Stewart, J., Walsh, K., 1989. *The search for quality*. Luton: Local Government Training Board.
- Sultan, P., Wong, H., 2010. Performance-based service quality model: an empirical study on Japanese universities. *Quality Assurance in Education*, 18(2), 126-143.
- Sumaedi, S., Mahatma Yuda Bakti, G., Metasari, N., 2012. An empirical study of state university students' perceived service quality. *Quality Assurance in Education*, 20(2), 164-183.
- Şahin, A. E., 2009. Eğitim fakültesinde hizmet kalitesinin eğitim fakültesi öğrenci memnuniyet ölçeği (EF-ÖMÖ) ile değerlendirilmesi. *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 37(37), 106-122.
- Şeleci, U., 2018. Türk Havacılık Sektöründe Hizmet Kalitesinin Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- Şimşek, H., İslim, Ö. F., Öztürk, N., 2019. Yükseköğretimde Kalite Arayışında Bir Gösterge Olarak Öğrenci Memnuniyeti: Bir Ölçek Geliştirme Çalışması. *Trakya Eğitim Dergisi*, 9(3), 380-395.
- Şimşek, U., 2018. Kent İçi Toplu Taşımacılığın Bir Şekli Olan Metro Hattında Hizmet Kalitesinin Ölçümü. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Talih, D., 2008. Hizmet Kalitesi Algılamalarına İlişkin Yabancı Dil Eğitim Kurumlarında, Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Tekeli, H., 2018. Measuring Factors That Influence Online Banking Service Quality In Turkey. Master’s Thesis. Bahcesehir University, Istanbul.
- Tutar, M., 2018. Bir Üniversite Hastanesinden Hizmet Alan Uluslararası Hastaların Hizmet Kalitesini Değerlendirmeleri. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Türkel, M., 2017. Servqual Modeli ile Hizmet Kalitesi Ölçümü ve Bir Eğitim Kurumunda Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Türkmen, E., 2018. Türkiye’de Mülteci Çocuk Emeği: Şanlıurfa’da Çalışan Suriyeli Mülteci Çocuklar. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Üner, A., C., 2018. Servqual Yöntemi ile Sigortacılık Sektöründe Hizmet Kalitesinin Ölçülmesi: Ankara İli Örnek Olayı. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Voss, R., Gruber, T., Szmigin, I., 2007. Service quality in higher education: The role of student expectations. *Journal of Business Research*, 60(9), 949-959.
- Welzant, H., Schindler, L., Puls-Elvidge, S. and Crawford, L., 2015. Definitions of quality in higher education: A synthesis of the literature. *Higher Learning Research Communications*, 5(3), 3-13.
- Yabacı, F., 2018. Havayolu Ulaştırma İşletmelerinin Tercih Edilmesinde Yiyecek-İçecek Hizmet Kalitesinin Rolüne İlişkin Bir Araştırma (THY Örneği). Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Yavuz, M., and Gülmez, D., 2016. The Assessment of Service Quality Perception in Higher Education. *Education and Science*, 41(184), 251-165.
- Yıldız, S. M., Kara, A., 2009. The PESPERS scale: An instrument for measuring service quality in the School of Physical Education and Sports Sciences (PESS). *Quality Assurance in Education*, 17(4), 393-415.
- Yılmaz, D. V., 2019. HESQUAL-Yükseköğretim Hizmet Kalitesi Ölçeğinin Türkçe Uyarlaması: Geçerlilik ve Güvenirlik Analizi. *Electronic Turkish Studies*, 14(2): 899-917.
- Yılmaz, V., Filiz, Z., Yaprak, B., 2007. Servqual yöntemiyle yükseköğretimde hizmet kalitesinin ölçülmesi. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(1), 299-316.
- Yousapronpaiboon, K., 2014. SERVQUAL: Measuring higher education service quality in Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 116, 1088-1095.
- Yüce, S., 2013. Yabancı Dil Eğitim Hizmetlerinde Hizmet Kalitesi Ölçümüne Yönelik Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Yüksel, L. İ., 2018. Sağlık Sektöründe Hizmet Kalitesinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi: Ankara’da Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Zammuto, R. F., Keaveney, S. M., O’Connor, E. J., 1996. Rethinking student services: assessing and improving service quality. *Journal of Marketing for Higher Education*, 7(1), 45-70.
- Zareinejad, M., Kaviani, M., Esfahani, M., Masoule, F., 2014. Performance evaluation of services quality in higher education institutions using modified SERVQUAL approach with grey analytic hierarchy process (G-AHP) and multilevel grey evaluation. *Decision Science Letters*, 3(2), 143-156.
- Zhoc, K. C., Webster, B. J., King, R. B., Li, J. C., Chung, T. S., 2019. Higher Education Student Engagement Scale (HESES): Development and Psychometric Evidence. *Research in Higher Education*, 60(2), 219-244.



ORGANİK ATIKLARIN YAPI MALZEMESİ OLARAK KULLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail DEMİR*, Muhammet ELMALI

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Anahtar Kelimeler

*Organik Atıklar,
Geri Dönüşü ve Geri
Kazanım,
Yapı Malzemeleri,
Çimento ve Beton Katkıları,
Çevrenin Koruması.*

Öz

Küresel ısınmayla birlikte çevresel sorunlara olan ilgi son on yıllarda giderek artmıştır. Küresel ısınmanın en önemli nedeni sanayileşme ile birlikte giderek artan CO₂ salınımıdır. Sanayileşme ile birlikte gelişen kentlerin altyapı ve üst yapılarının inşasında ana girdi beton ve buna bağlı olarak çimento üretimi gelmektedir. Çimento fabrikalarında, üretim prosesinde ortaya çıkan CO₂ ve partiküller hava kirleticileri arasında ilk sıralarda yer almakta, büyük oranda atmosfere sera gazı salınımı yapmaktadır. Küreselleşen Dünyada sanayileşme ve kentleşmenin etkisiyle birlikte kaynakların aşırı kullanımı ve artan tüketim sonucu atık miktarı da sürekli artış göstermektedir. Gittikçe katlanarak büyümekte olan atık sorunu; toplumu, aileyi ve bireyi etkilemekte hayat kalitesini olumsuz etkilemektedir. Atık sorununu çözmek için, toplanan materyallerin yeniden işlenmesi, üretimde kullanılması olan geri dönüşüm, bir zorunluluk olarak günümüz Dünyasında önemli yer tutar. Organik atıklar arasında: tarımsal atıklar, fıstık kabuğu, fındık kabuğu, pirinç kabuğu, şeker kamışı, palmye yağı, saman, çay artıkları, pamuk sapı, ayçiçeği sapı, mısır koçanı, pamuk ve tekstil atıkları, odun lifleri vb yer almaktadır. Bu çalışmada, organik kökenli atıkların yapı malzemeleri üretiminde kullanılabilirliği üzerine yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Çalışmada, birçok atık türünden (tarım, evsel, tıbbi, sanayi, santral, vb.) organik kökenli atıklar seçilerek, yapı malzemesi üretiminde tekrar kullanılması veya geri dönüşümü ile kaynak kullanımının ve bertaraf oranını azaltarak çevrenin korunmasına katkı sağlanabileceği ortaya konmuştur.

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF ORGANIC WASTES AS A BUILDING MATERIAL

Keywords

*Organic Wastes,
Recycling and Recovery,
Construction Materials,
Cement and Concrete
Additives,
Environmental Protection.*

Abstract

With global warming, the interest in environmental problems has been increased steadily in the last decades. The most important cause of global warming is the increasingly CO₂ emission with industrialization. The main input in the construction of the infrastructure and superstructure of the cities that developed with the industrialization is concrete and accordingly cement production. In cement factories, emerging in the production process CO₂ and particles are among the top air pollutants, emitting greenhouse gases to the atmosphere to a large extent. With the effect of industrialization and urbanization, the amount of waste increases continuously as a result of excessive use of resources and increasing consumption in the globalizing world. Waste problem that is growing exponentially; It has been affects the society, family and individual, and its negatively affects the quality of life. To solve the waste problem, recycling, which is the reprocessing of collected materials and their use in production, has an important mission in today's world as a necessity. Organic waste includes: agricultural wastes, peanut shell, nutshell, rice husk, sugar cane, palm oil, straw, tea scraps, cotton stalk, sunflower stalk, corn cob, cotton and textile wastes, wood fibers, etc. In this study, studies on the usability of organic wastes in the production of building materials were evaluated. In the study, it has been revealed that by selecting organic origin wastes, reusing or recycling in building material production, it has been shown that it can contribute to the protection of the environment by reducing the rate of resource use and disposal.

* İlgili yazar / Corresponding author: idemir@aku.edu.tr, +90-272-228-1423

Alıntı / Cite

Demir, İ., Elmalı, M., (2020). Organik Atıkların Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1303-1311.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Demir, 0000-0001-8493-0309
M. Elmalı, 0000-0003-2281-6126

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	17.08.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	11.10.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Küreselleşen Dünyada sanayileşme ve kentleşmenin ihtiyacı olan doğal kaynakların aşırı ve bilinçsiz kullanımı sonucu atık miktarları sürekli artış eğilimine sahiptir. Küresel ölçekte ortaya çıkan atık sorunu; toplumu, aileyi ve bireyi etkilemektedir. Daha önce toplanan materyallerin yeniden işlenmesi, üretilmesi ve kullanılması olan geri dönüşüm, günümüz Dünyasında önemli yer tutmaktadır (Gündüzalp ve Güven, 2016). Sanayi Devrimi ile üretimdeki artış, teknolojinin gelişmesi ve hızla yaygınlaşması, yaşam standardının yükseltilmesi hedefleri atmosferde sera etkisine yol açan gazların artmasına neden olmuştur. Özellikle İkinci Dünya savaşından sonra sera gazlarındaki hızlı artışın yol açtığı küresel ısınmanın sonucu olarak insan, bitki ve hayvan türlerinin yaşamını tehdit eden doğal felaketlerde artış kaydedilmiştir. Yirminci yüzyılın son çeyreğinden günümüze kadar gelen süreçte endüstri alanındaki gelişmeler, doğal hammadde kaynaklarının ve fosil yakıtların aşırı tüketimi sonucu sera gazları salınımının artmasına ve buna bağlı olarak küresel ısınmanın giderek artışına yol açmıştır. Sanayileşmenin üretim aşamasında doğrudan CO₂ salınımına neden olması dışında, kullanılan hammaddelerden arda kalan atıklarda çevre için büyük sorun oluşturmaktadır. Kil, kum, taş, çakıl, çimento, tuğla, fayans, boya, kereste ve çelik gibi geleneksel malzemeler inşaat sektöründe ana yapı bileşenleri olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin üretiminde mevcut doğal kaynaklar kullanılmaktadır. İnşaat sektörü doğal kaynak kullanımının büyüklüğü ve sürekliliği nedeniyle doğal çevreye olan etkisi bakımından ayırt edici özelliğe sahiptir. Çok fazla çeşide sahip yapı malzemelerinin üretimi sırasında karbon monoksit konsantrasyonu, sülfür oksitler, azot oksitler ve süspansiyon halindeki parçacık maddeler atmosfere yayılmaktadır (Pappua vd., 2007). Nüfus artışı, artan kentleşme, teknolojik yenilikler nedeniyle yükselen yaşam standartları, endüstri, madencilik, evsel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan katı atıkların miktarının ve çeşitliliğinin artmasına katkıda bulunmuştur. Küresel olarak 2002 yılında tahmini atık üretimi miktarı 12 milyar ton olup, bunun 11 milyar tonu endüstriyel atık ve 1,6 milyar tonu kentsel katı atıklardır. 2025 yılına kadar yılda yaklaşık 19 milyar ton katı atık üretilmesi beklenmektedir (Yoshizawa vd., 2004). Sanayi hammaddelerinin sınırlı doğal kaynaklar olduğu, giderek artan nüfusun tüketimi daha çok artıracığı da dikkate alınarak, çoğu hammadde kaynaklarının önümüzde ki yüzyıllarda tükeneceği beklenmektedir. Bu nedenle hem atık azaltma hem de hammadde kaynağı olabilmesi açısından birçok atık türünden organik kökenli, yenilebilir, çevreye ve sağlığa zararsız tarım atıklarının inşaat sektöründe kullanılabilirliği önem kazanmıştır. Bu çalışmada organik kökenli atıkların yapı malzemeleri üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar derlenerek incelenmiştir. Organik kökenli atıkların üretim prosesinde önemli bir kullanım potansiyeli olduğu ve çeşitli çevre dostu yapı malzemelerinin üretilebileceği ortaya konmuştur.

Biyokütle Türkiye açısından önemli bir potansiyele sahiptir ve bu anlamda biyokütle odaklı enerji politikalarının geliştirilmesi Türkiye’de sürdürülebilir, yerli, ucuz ve temiz enerji üretiminde önemli katkı sağlayabilir (Gürel 2020). Tarımsal atıklar, tarımsal üretim ve meyve, sebze, et, kümes hayvancılığı, süt ürünleri ve ekinler gibi ham tarımsal ürünlerin ilk prosesinden arda kalan atıklar olarak tanımlanmaktadır (Öner 2109). Türkiye ‘de dikkate değer miktarda organik kökenli (tarım) atıkları ortaya çıkmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Türkiye’de potansiyel tarım atıklar (Bolat, 2005) (Potential agricultural waste in Turkey)

TARIMSAL KALINTILAR	YILLIK ÜRETİM (MİLYON TON)
Ayçiçeği sapsarı	2.7
Buğday sapsarı	26,4
Arpa sapsarı	13.5
Mısır sapsarı	4.2
Pamuk sapı ve koza	2.9
Şeker pancarı sapsarı	2.3
Fındık kabukları	0.8
Yulaf sapsarı	0.5
Çavdar sapsarı	0.4

2. Organik Atıkların Beton Üretiminde kullanılabilirliği (Usability of Organic Wastes in Concrete Production)

İnşaat sektörünün ana girdilerinin başında çimento gelmekte olup, çimento üretimi 2017 yılında Dünyada 4.1 Milyar ton, Türkiye’de ise 79.9 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Çim. Sek. Rap., 2018). İnşaat sektöründe, çimento üretimi esnasında CO₂ salınımından dolayı çimento fabrikaları, partiküller hava kirleticileri arasında ilk sırada yer almaktadır. Çimento imalatı sırasında klinikleri yakmak için kullanılan döner fırınlarda oluşan gazlar (SO, CO, NO), öğütülmüş kireçtaşı ve çimento tozları bu endüstride çevreye yayılan en önemli kirleticilerdir. Çimento fabrikalarının bilinen bu etkilerinin yanı sıra diğer bir önemli etkisi de çevreye kadmiyum elementi yaymasıdır. Çevreye yayılan kadmiyum toprakta birikmekte, buradan bitkilere geçip daha sonra besin zinciri ile insanlar tarafından tüketilmektedir (Kartalkanat, 2010). Talepteki artış ile birlikte artan çimento üretimi, hem atmosfer hem de çevre için risk oluşturmaktadır. Üretim ve tüketim faaliyetleri sonucu ortaya çıkan organik atıkların uygun prosesler ile çimento ile ikame edilmesi sonucu çimentoya duyulan ihtiyaç azaltılabilir ve üretim miktarı düşürülebilir. Ancak organik atıklarla üretilen betonun mekanik, fiziksel ve reolojik özellikleri normal Portland çimentosu (PÇ) ile üretilen betonundan farklı olmamalıdır.

Organik kökenli atıklarla yapılan araştırmalarda, Alabadan vd. (2005) PÇ, Bambara Yerfıstığı Kabuğu Külü (YKK) ile ikame edilerek üretilen beton incelenmiştir. Kimyasal analizi çimentoya çok benzeyen YKK, ağırlıkça çimento yerine %0 - %50 arasında oranlarda ikame edilmiştir. Üretilen betonunun mukavemeti, kür süresi ile artmış, fakat artan YKK yüzdesi ile azalmıştır. 28 günde kontrol numunesi 31.24 N/mm² mukavemete ulaşırken, kül ile en yüksek mukavemet (20.68 N/mm²) %10 kül ikamesi ile elde edilmiştir. Buari vd. (2013) PC'nin YKK ile %0-%20 arasında oranlarda ikame edilmesini araştırmıştır. Çalışmada %10 YKK ikamesinin en iyi mekanik sonuçları verdiği görülmüştür. Nwofor ve Sule (2012) benzer bir çalışmada Nijarya yer fıstığı kabuğu külü kullanımını araştırmıştır. PC %0-%40 arasında oranlarda ikame edilmiştir. Sonuçlar, YKK ile ikame yüzdesi arttıkça yoğunluk ve basınç mukavemetinde bir azalma göstermiştir. Her üç çalışmada da çimentonun beton üretiminde YKK ile ikame edilmesinin %10'u geçmeyecek şekilde mümkün olduğunu göstermiştir.

Pirinç kabuğu, pirinç üreten ülkelerde bol miktarda bulunan pirinç tanesinin doğal bir dış kabuğudur. Bir ton pirinçten yaklaşık 200 kg kabuk ve yakma sürecinden sonra bunun da yaklaşık %18-20'si kül olarak ortaya çıkar (Khan vd., 2012; Le vd., 2014; Aprianti vd., 2015;). Tarım atığı olan ve süper puzolan olduğu bilinen pirinç kabuğu külü (PK) beton için sıkça kullanılan bir mineral katkıdır (RILEM, 2013; Mehta ve Folliard, 1992). Çimentolu ürünlerin davranışı PK'nın kaynağına göre değişir (James ve Rao, 1986; Malhotra ve Mehta, 1996). Akeke vd. (2013) PC, PK ile kütlece %10-25 oranlarında ikame edilmiştir. Sonuçlar; üretilen betonların 33-38.4 N/mm² arasında değişen basınç ve 2.4-3 N/mm² arasında değişen çekme mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir. Benzer bir çalışma yapan, Kishore vd. (2011) PC, PK ile ikame edilerek yüksek mukavemetli beton üretmeyi çalışmışlardır. Sonuçlar; kütlece %10 ikame betonların 28 günde oldukça yüksek mekanik sonuçlar göstermiştir. Sensale (2005) yaptığı çalışmada, Uruguay'daki bir çeltik öğütme endüstrisinden elde ettiği PK ile ABD'den kontrollü yakma ile üretilen PK karşılaştırması ve 91 günlük basınç dayanımı üzerine araştırma yapmıştır. İki farklı PK, PÇ ile kütlece %10 ve %20 oranlarında ikame edilmiş ve üç farklı su/çimento oranı (0.50, 0.40 ve 0.32) kullanılmıştır. Atık PK'nın erken yaşlarda basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etki sağladığı, ancak kontrollü yakma ile üretilen PK ile betonların 91 günlük basınç dayanımı çok daha yüksek çıkmıştır. Hava geçirgenliğinin sonuçlarında ise her iki tür PK'lı betonlar puzolanik etki nedeniyle kontrol numunesine göre daha yüksek performans göstermiştir. Saraswathy ve Song (2007) PK ikameli betonunun korozyon performansını araştırmıştır. Bu amaçla üretilen betonların korozyon performansı açık devre potansiyel ölçümleri, hızlı klorür iyonu geçirgenlik testi ve baskı gerilimi testi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PK'nın %30'a kadar ikame edilmesinin, klorür geçirgenliğini azalttığı, mukavemet ve korozyon direnci özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. PK ile yapılan çalışmalar, PK'nın uygun değiştirme oranlarında yapısal beton olarak kullanılabileceğini kanıtlanmıştır. PK'nın reaktivitesi, yüksek amorf silika içeriğine ve parçacıkların gözenekli yapısı sayesinde çok geniş yüzey alanına sahip olmasına, diğer anlamda materyalin inceliğinin artması atfedilmektedir (Mehta, 1978; Mehtra ve Folliard, 1992; Cook, 1984; James ve Rao, 1986; Kraiwood vd., 2001; Paya vd., 1995; Paya vd., 1997).

Şeker kamışı küspesi, şeker rafine endüstrisinin lifli atık ürünüdür. Yashwanth ve Nagarjuna (2016) Çimento ikamesi olarak şeker kamışı küspesi külü (ŞKK) ve uçucu kül (UK) kullanarak beton üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, ŞKK ve UK ağırlıkça çimento ile %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında değiştirilmiştir. Normal beton ile karşılaştırıldığında ŞK ve UK ikamesi betonunun işlenebilirliğini artırmış ve ikame oranı arttıkça betonun basınç dayanımının %15'e kadar arttığı belirlenmiştir. Sreenivasulu vd. (2018) agrega olarak granit tozu ve ŞKK, kütlece %0, %5, %10, %15 ve %20 arasında çimento ile ikame edilerek beton üretmişlerdir. Sonuç olarak ŞKK'nin %10'a kadar çimento ile değiştirilmesinin uygun olacağı önerilmiştir. Bu çalışmalarda ŞKK'nin çimento ikamesi olarak belli oranlarda kullanılabileceği önerilmiştir.

Palm yağı olarak da bilenen Palmiye yağı, üretiminin bir yan ürünü olan palmiye yağı yakıt külü (PYK), atık depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Konu ile ilgili araştırmacılar PYK'nın beton üretiminde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Tangchirapat vd. (2007) PYK, çimento ile üç farklı tipi incelikte ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında değiştirilerek puzolanik özelliği ve betonun priz süresi, basınç dayanımı ve sülfat atağına bağlı genleşme gibi özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, betonlarda PYK kullanımının priz sürelerinde gecikmeye neden olduğunu göstermiştir. Beton örneklerin 56 günlük dayanımları PYK'nın mükemmel bir puzolanik malzeme olduğunu ve %20 ve %30 oranlarında betonda çimento yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Chindaprasirt vd. (2007) PYK ve PK ağırlıkça %20, %40, % 55 oranlarında çimento yerine kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımı ve su geçirgenliği araştırılmıştır. Çimentonun her iki malzeme ile değiştirilmesi, işlenebilirliği azaltmış ve daha fazla su ihtiyacı göstermiştir. Test sonuçları; %20 oranında PYK veya PK içeren betonların basınç dayanımları PÇ ile üretilen betonun basınç dayanımına yakın sonuçlar göstermiş, su geçirgenliği normal betondan daha düşük çıkmıştır. İçerisinde %40 oranında PYK veya PK bulunan betonun basınç dayanımları PÇ ile üretilen betondan daha düşük olmasına rağmen, su geçirgenliği normal betondan daha düşüktür. PYK veya PK oranı %55' çıktığında betonun test sonuçları yeterli değerlere ulaşamamıştır. Pone vd. (2018) PYK, çimento ile ağırlıkça %2.5, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında değiştirilerek ve 0.5 su/çimento oranı sabit tutularak üretilen betonların erken yaşlarda dayanım özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, %2.5 ve %5 oranında PYK içeren numunelerin, kontrole kıyasla daha yüksek erken basınç mukavemeti gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar, PKY'nin puzolan katkı olarak beton üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Binici vd. (2008) mineral katkı maddesi olarak mısır koçanı (MK), buğday samanı (BS) ve çınar ağacı yaprak külü (ÇK) kullanılarak beton dayanıklılığı üzerine etkilerini incelemişlerdir. İnce agrega olarak %2, %4 ve %6 oranlarında ikame edilmiş üç seri halinde on beton karışımı üretilerek araştırılmıştır. Betonun dayanıklılığını belirlemek için, 7, 28, 90, 180 gün normal kür ve 18 ay sodyum sülfat çözeltisi kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları, aşınma direnci ve su geçirgenliği araştırılmıştır. Test sonuçları, MK, BS ve ÇK ilavesinin geleneksel betona kıyasla iyi işlenebilirlik ve aşınma direnci sağladığını göstermiştir. Ayrıca, MK, BS ve ÇK katkılarının beton örneklerin sodyum sülfat direncinde önemli bir artış sağladığını göstermiştir. Çalışma sonucuna göre, dayanıklı beton üretimi için MK, BS ve ÇK katkılı beton üretimi tavsiye edilmiştir. Demirbaş ve Aslan (1998) betona çay atığı, öğütülmüş fındıkkaşuğu, ladin, kayın ağacı atıkları karıştırarak mekanik özelliklerini incelenmiştir. Öğütülmüş fındıkkaşuğu ve kayın ağacının PÇ için katkı maddesi veya kısmi ikame olarak kullanılabileceği öne sürülmüştür. Bununla birlikte, çay atıklarının betonun mekanik özelliklerine zarar vermiştir. Baluch vd. (1978) yaptıkları çalışmada, çelik elyaf takviyeli çimento harcının kırılma direncini belirme için önerilene benzer bir model kullanarak, sisal elyaf takviyeli çimento harcının mukavemetini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, sisal elyaf takviyesinin çimento harcının basınç mukavemetini geliştirdiği görülmüştür.

3. Yalıtım Malzemeleri Üretiminde Kullanılabilirliği (Usability in Insulation Materials Production)

Günümüzde, inşaat sektöründe enerji tasarruflu ve çevreci yeşil binalara olan ilgi hızla artmaktadır. Yeşil binaların inşasında, enerji tasarrufu sağlayan yalıtım malzemelerinin organik malzemeler ve atıklardan üretilmesi önemli bir araştırma alanı olmuştur. Bu amaçla; Khedari vd. (2004) tavan ve duvar yalıtım malzemesi olarak kullanıldığında enerji tasarrufu için etkili olan, düşük ısı iletkenliğine sahip Durian kabuğu ve Hindistan cevizi elyafı karışımından yeni ve düşük maliyetli yonga levha geliştirmiştir. Durian kabuğu ve hindistan cevizi elyafı ağırlıkça 10/90 karışım oranı ile üretilen levhanın 856 kg/m³ yoğunluk, 0.1342 W/mK ısı iletkenlik, 21.867 kgf/cm² elastikiyet modülü, %6.22 nem içeriği değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Xu vd. (2004) kenaf çekirdeğinden düşük yoğunluklu, bağlayıcısız, formaldehit içermeyen yonga levha geliştirmiştir. Levhalar, buhar enjeksiyon presleme (buhar basıncı 1.0 MPa, buhar süresi 7-10 dakika) kullanılarak başarılı bir şekilde bağ yapısı gelişmiştir. 10 dakikalık buhar etkisi ile 200 kg/m³ yoğunluktaki yonga levhaların ısı iletkenliği, taş yününe benzer değerler göstermiştir. Zhou vd. (2010) pamuk sapı elyafından bağlayıcısız, yüksek frekanslı sıcak presleme kullanılarak yonga levhalar geliştirilmiştir. Yoğunluğu 150-450 kg/m³ arasında üretilen yonga levhaların, aynı yoğunluk aralığında genleşmiş perlit ve vermikülite yakın olan 0.0585-0.0815 W/mK arasında değişen ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Lertsutthiwong vd. (2008) kağıt mendil imalatından ve mısır kabuğundan elde edilen atık karışımından üretilen düşük termal iletkenliğe sahip yeni yonga levhalar geliştirilmiştir. Karışıma eklenen mısır kabuğu miktarı arttıkça yonga levha yoğunluğunun azaldığını ve nihai ürünün ısı yalıtım performansı artış göstermiştir. Çalışmada, 150-450 kg/m³ arasında yoğunluğa sahip 0.058-0.081 W/mK arasında değişen ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Zhou vd. (2004) içi boş buğday samanından düşük yoğunluklu yonga levha geliştirmiştir. Çalışmada, yoğunluğu 100-250 kg/m³ arasında değişen ve yüksek ısı yalıtım performansına sahip yalıtım levhaları elde edilmiştir. Tangjuank (2011) bağlayıcı olarak doğal kauçuk lateks kullanılarak ananas yapraklarından yonga levha geliştirmiştir. Levhalar 20 ve 1.5 cm kalınlığında olacak şekilde doğal kauçuk lateksin ananas lifi üzerine püskürtülmesi ile üretilmiştir. Levhalar, 210 kg/m³ yoğunluğu ve 0.035 W/mK ısı iletkenlik değeri ile yüksek ısı yalıtım performansı elde edilmiştir. Paiva vd. (2011) mısır koçanı atıklarından 3, 6 ve 8 cm kalınlığında yonga levhalar geliştirmiştir. Isı iletkenlik değerleri 0.101 W/mK levhalar elde edilmiştir. Binici vd. (2011) ısıtma için kullanıldığından çevre için ciddi bir sorun olan ayçiçeği sapı ve anız gibi pamuklu tekstil atıkları ile binaların yalıtımında kullanılmak üzere 30x40x2.5 cm dikdörtgen bloklar, basınç altında hazırlanmıştır.

Bağlayıcı olarak epoksi kullanılarak üretilen blokların yoğunluklarına bağlı olarak 0.0728-0.2616 W/mK arasında ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Organik kökenli atıklar kullanılarak inşaat sektöründe kullanılabilecek ısı iletkenliği düşük yalıtım malzemeleri üretilebileceği ortaya konmuştur.

Yalınkılıç vd. (1998) çay yapraklarının yüksek fenolik ekstrakt içeriğinin ve çay üreten fabrikalarda atık olarak bolluğunun faydalanılarak yonga levha üretiminde kullanılması konusunda çalışmalar yapmıştır. Atık çay yaprakları ile üretilen yonga levhanın yüksek fenolik ekstrakt içeriği nedeniyle biyolojik bozulmalara karşı daha dirençli olması beklenmektedir. Levhanın üretimi sırasında bağlayıcı olarak üre formaldehit reçinesi kullanılmıştır. Üretilen levhaların test edilmiş fiziksel ve mekanik özellikleri standart değerleri karşıladığı görülmüştür. Bir dizi uygulama ile genellikle poli ahşap veya fenolik reçineyle bağlanmış ahşap-çimento levhalar, sağlam, hava koşullarına dayanıklı ve maliyeti düşük panel ürünü oluşturma potansiyeline sahiptir (Anonymous, 1974). Ancak, ahşap-çimento levha gelişimi bağlanma ile ilgili mekanizmalarda temel anlayış farklılıkları nedeniyle kısmen yavaşlamıştır (Sandermann ve Kohler, 1964; Takano vd., 1977).

4. Çimento Kompozitler (Cement Composites)

Dünya genelinde tarım, ahşap ve mobilya endüstrileri gibi çeşitli kaynaklardan üretilen çok miktarda lignoselülozik atık, çevresel kaygılara yol açmaktadır. Bu atıkların çimentolu yapı malzemelerin üretiminde kullanılması sorunların çözümüne katkı sağlayabilir (Karade, 2010). Üretiminde kavak ağacı ile plastiğin kullanılarak üretilen ahşap- plastik kompozitler, düşük maliyet, atık geri dönüşümü, çevre dostu ve düşük karbon ayak izi gibi çok önemli özelliklere sahiptir. Ahşap- plastik kompozitler standart mekanik ve fiziksel özellikleri karşılayarak önemli kullanım potansiyeli oluşturmaları beklenmektedir (Özyurt, 2020).

Beton, harç ve çimento hamuruna lif takviyesinin dâhil edilmesi, malzemelerin kırılma tokluğu, eğilme mukavemeti ve yorulma direnci, darbe dayanımı, termal şok direnci gibi temel mühendislik özelliklerinin çoğunu geliştirebilir. Son yıllarda, doğal elyaf takviyeli, çimento esaslı kompozitlerin potansiyel uygulamaları dünya genelinde büyük ilgi görmektedir. Birçok ülkede sisal, hindistancevizi, jüt, bambu ve ahşap lifleri gibi doğal liflerle takviye edilmiş çimento esaslı matrislerin çeşitli mekanik özellikleri, fiziksel performansı ve dayanıklılığı konusunda araştırmalar yapılmıştır (Tolêdo vd., 1999). Bitki bazlı doğal lifler, hafif, aşındırıcı olmayan, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilir yapıları nedeniyle geleneksel sentetik liflere göre büyük bir avantaja sahiptir. Bambu lifi nispeten yüksek mukavemete, dar mikrofibril açısına ve düşük maliyete sahiptir ve polimer matrisli kompozitlerde takviye olarak etkili bir şekilde kullanılabilir, sentetik liflerin bir dereceye kadar yerini alır (Liu vd., 2010).

Pereira vd. (2013) çimentolu matris için takviye olarak hindistancevizi kabuğu lifinin kullanılmasını ve PC'nin PK ile kısmen ikamesini değerlendirmiştir. Karışımlardan biri hindistancevizi lifleri olmadan referans numunesi olmak üzere, ağırlıkça %5 hindistancevizi lifi ve PC'ye %0, %30, %40 ve %50 oranlarda PK ile ikame edilmiştir. Hızlandırılmış yaşlanma testlerine tabi tutulan kompozit levhada hindistancevizi lifinin kompozit levhanın yoğunluğunu azalttığı ve mekanik performansı geliştirdiği belirlenmiştir. Zhu vd. (1994) muz lifi takviyeli çimento kompozitlerin üretimi, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Muz lifi ile 20 MPa'dan fazla eğilme dayanımına sahip kompozit ürünler üretilmiştir. Sisal bitkisi, halat, kilim ve çimento kompozitlerin üretiminde kullanılan, büyük miktarda artık üreten önemli bir tarım ürünüdür. Atıkların değerlendirilme için; Lima vd. (2014) sisal lifinin çimento kompozitlerin takviyesinde kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Sonuçlar, kompozitlerin doğal sisal liflerle takviye edilmesi halinde, geleneksel kompozit ürünlerden daha üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretilebileceğini göstermektedir. Chatveera vd. (2005) çatı malzemesi olarak sisal elyaf takviyeli çimento kompozitinin kullanılmasının araştırmayı amaçlamaktadır. Test sonuçları, sisal elyaf çatı kaplama levhaları için elde edilen bükülme direnci normal çatı kaplama levhalarından daha azdır. Ancak sisal elyaf çatı kaplama levhaları düşük maliyetiyle geçirimsizlik ve yangına dayanıklılık özellikleri gösterir ve yeterli dayanıklılığa sahiptir. Khorami ve Ganjian (2011) çimento kompozitlerin üretiminde Tarımsal Atık Liflerinin (TAL) kullanımı araştırmıştır. Çimento kompozitleri üretmek için PC ağırlıkça %2 ve %4 oranında küspe, buğday ve okaliptüs lifleri ilavesi ile üç farklı TAL kullanılmıştır. Ayrıca, silis dumanının çimento kompozitlerin eğilme davranışı özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuçlar, çimento kompozitlerin eğilme davranışını liflerin tipine, uzunluğuna, çapına, en boy oranına ve dokusuna bağlı olduğunu ve lif takviyesinin tüm gruplar için eğilme mukavemetini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, silis dumanı tüm gruplar için eğilme mukavemetini artırmıştır. Yapılan çalışmalar tarımsal atık liflerin ticari olarak alternatif lif kaynağı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

5. Duvar Malzemeleri Üretiminde Kullanılabilirliği (Usability in the Production of Wall Materials)

Tuğla, blok gibi ürünlerin yalıtım kapasitesini artırmanın yolu kil bünyede gözeneklilik oluşturmaktır. Hem gözenekliliği artırmak hem de atıkları değerlendirmek amacıyla; Demir (2006) işlenmiş atık çayın (İAÇ) kil

tuğladaki kullanım potansiyelini, dayanıklılık ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Ham tuğla kiline farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %2,5, %5) İAÇ eklenmiştir. Sonuç olarak, İAÇ'nin düşük maliyetli ve çevre korumasından faydalanarak yapı tuğlalarında kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Demir (2008) kil tuğlalarında da talaş, tütün artıkları ve çim çeşitli organik atıkların kullanım potansiyelini araştırmıştır. Ham tuğla kiline farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %2,5, %5, %10) organik atıklar ilave edilerek pişmiş kil bünyede gözenek oluşturma etkisi incelenmiştir. Organik atıkların kil bünyede gözenek oluşturma için etkili olduğu ve tuğlanın kabul edilebilir mekanik özellikleri koruduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, talaş, tütün artıkları ve çim, tuğla gözenek oluşturuca ajanlar olarak çevre açısından güvenli bir şekilde kullanılabilmesi görülmüştür. Agbede ve Joel (2011) PK, kil tuğlasının pişmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Ağırlıkça %2-10 oranlarında PK, kile ilave edilerek üretilen örnekler 800 °C'de pişirilmiştir. PK oranı arttıkça plastisitenin azaldığı, buna karşı %2 PK ilavesi ile 18.64 N/mm² basınç mukavemetine ve % 14,8 su emme değeri elde edilmiştir. Benzer bir çalışmada, Khedari vd. (2004) PK ilavesi ile üretilen tuğlalar ile 2.1 N/mm² basınç dayanımı elde etmiştir. Demir vd. (2005) odun, saman ve sazlardan üretilen kraft hamuru artıklarının kil tuğladaki kullanım potansiyelini ve kil gövdesinde gözenek oluşturma yeteneğini araştırmıştır. Ham tuğla kiline farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %2,5, %5, %10) organik atıklar karıştırılmıştır. %2,5 ve %5 atık ilavesinin kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip ve kil gövdesinde gözenek oluşturma için etkili olduğu görülmüştür.

Mahmoud vd. (2012) yer fıstığı kabuğu külü (YKK) kullanılarak, çimentoya ikame olarak beton blok üretimini araştırmıştır. Çimento YKK ile farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40, %50) yer değiştirilmiştir. Beton blokların basınç mukavemetinin 0.26 -4.50 N/mm² arasında değiştiği ve ikame oranı %20 oranında elde edilen 3.58 N/mm² basınç değerinin Nijerya Endüstri Standardını sağladığı görülmüştür. Oyetola ve Abdullahi (2006) PK kullanılarak üretilen beton blokların basınç dayanımı araştırılmıştır. PÇ, PK ile farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40, %50) ikame edilmiştir. Yüksek ikame oranlarında beton blokların basınç dayanımı standartların altında olduğu, buna karşı % 20'lik ikamenin optimum bir değiştirme seviyesi olduğu belirlenmiştir. Pinto vd. (2012) agrega olarak granül mısır koçanı kullanılarak hafif bir beton üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen mısır koçanı betonunun, yapısal olmayan uygulama amaçları için hafif bir beton için gerekli olan yeterli malzeme özelliklerine (382.2 kg/m³ yoğunluk, 120.0 kN/m² basınç dayanımı) sahip olabileceği göstermiştir. Sooksaen vd. (2018) Tayland'daki tarım endüstri atıklarından elde edilen mısır kabuğu lifi, küspe lifi ve hindistancevizi kabuğu lifi kullanarak hafif beton blok geliştirmiştir. Kütlece %30 kadar hindistancevizi kabuğu lifi kullanılarak optimum mekanik özelliklerde hafif beton blok elde edilmiştir. Sobuz vd. (2014) Malezya'da tropik bölgelerde katı atık türü olan Palmiye Yağı Kabuğu (PYK) farklı karışım oranlarıyla, hafif agrega olarak %0-50 arasında betona ilave edilerek üretilen hafif betonun dayanım ve maliyet analizi yapılmıştır. Hafif betonun basınç dayanımının PYK yüzdesi arttıkça azaldığı, buna karşı %15'e varan olası maliyet düşüşünü göstermiştir. PYK kullanımının hafif beton üretiminde büyük potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

6. Çimento Harçlar Üretiminde Kullanımı (Use of cement mortar production)

Sangeetha (2016) harç karışımlarında, pirinç kabuğu külünün (PK) çimento ile %10-40 oranlarda ikame edilerek harç özelliklerine etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, PK günümüzde üretilen çimento beton bloklardan daha ekonomik ve çevre dostu olduğu ve yapı malzemesi üretiminde kullanılabilmesi öne sürülmüştür. Chatveera ve Lertwattanaruk (2009) harç karışımlarında, su-bağlayıcı oranları 0.55 ve 0.65 olan PK çimento ile belirli oranlarda (%10, %30, %50) ikame edilmesinin beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Harcın sülfat saldırısı dayanımını ölçmek için %5 sodyum sülfat (Na₂SO₄) ve magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltileri kullanılmıştır. Çalışmada, PK'nın betonda puzolanik bir malzeme olarak uygulanabileceğini ve sodyum sülfat saldırısına karşı direnci geliştirebileceğini, ancak magnezyum sülfat saldırısına karşı direnci azaltabileceğini öne sürülmüştür. Duggal vd. (2020) çimento harcı kullanılarak üretilen çatı kiremitlerinin, PK ve ŞKK ayrı ayrı çimento ile belirli oranlarda (%10, %15, %20) ikame edilmesinin beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Araştırmada, PK ve ŞKK çimento ile ikame edilerek çatı kiremitlerinin üretimi için çevreci bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Chindaprasirta vd. (2008) harç karışımlarında, 0.5 su-bağlayıcı oranı olan PYK, PK ve UK çimento ile belirli oranlarda (%20, %40) ikame edilmesinin, betonun klorür penetrasyonuna karşı etkisi araştırılmıştır. Harç karışımlara, %3 NaCl harç çözeltilisine 30 günlük daldırmadan sonra basınç dayanımı, hızlı klorür penetrasyon testi, hızlı geçirgenlik testi ve klorür penetrasyon derinliği incelenmiştir. Test sonuçları, harcın klorür penetrasyonuna karşı direncin, PYK, PK ve UK ile ikame edilmesi ile önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir. Canovas vd. (1992) çimento harçlarında bitkisel lif mineralizasyonu problemini çözmek için sisal elyaf kullanarak çalışma yürütmüştür. Kullanılan ürünler, harcın alkalilik derecesini azaltmada, harç gözeneklerini kapatmada ve liflerde su emiliminde azaltmada etkinlik göstermektedir. Kullanılan katkı maddelerinin alkalinite azaltma gücü, özellikle alkali reaktif agregalarla yapılan betonların dayanıklılığı için yeni araştırmalara konu olması beklenir.

7. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Betonun ana bileşeni olan Portland Çimentosunun Dünya'daki yıllık üretimi 4.5 Milyar ton civarında olup kitlesel üretimde ön sıralarda yer almaktadır. PÇ'nin üretimi, önemli miktarda sera gazı olan CO₂ salınımına yol açar; bir ton PÇ'nin üretiminde yaklaşık bir ton CO₂ ve diğer sera gazları üretilmektedir. Organik kökenli atıkların, çimentoya belirli oranlarda ikame olarak kullanılabilmesi yürütülen çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu atıkların çimento ikamesi olarak beton ve beton ürünlerin üretiminde kullanılması ile önemli çevresel ve ekonomik faydalar sağlanabilecektir. Bu uygulamalar çimento üretiminde azalma sağlarken, hem karbon salınımını azaltacak hem de atıkların doğal çevreye vereceği zararlar önemli ölçüde engellenecektir. Yürütülen çalışmalarda organik atıkların önemli bir selüloz kaynağı olması ve selülozunda çimento matrisini güçlendirmesine olan etkisi nedeniyle çimento kompozitlerde sıkça tercih edilmektedir. Organik kökenli atıkların hafif beton üretimi, duvar blokları üretimi, yalıtım malzemeleri üretimi, tuğla, kiremit vb. üretiminde katkı olarak kullanılması ile bu atıkların yeniden kullanımı ve geri kazanımı sağlanarak çevreci malzemelerin üretilmesi yaygınlaşacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Agbede, I.O., Joel, M., 2011. Effect of rice husk ash (RHA) on the properties of Ibaji burnt clay bricks. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2, 674-677.
- Akeke, G.A., Ephraim, M.E. and Ukpata, J.O., 2013. Structural properties of rice husk ash concrete. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3, 57-62.
- Alabadan, B.A., Olutoye, M.A., Abolarin, M.S. and Zakariya, M., 2005. Partial replacement of Ordinary Portland Cement (OPC) with Bambara Groundnut Shell Ash (BGSA) in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 6, 43-48.
- Anonymous, N.D., 1974. Wood-Cement Building Boards, Bison System Board Plants, Bison-Werke, Springer, W. Germany.
- Aprianti, E., Shafiq, P., Bahri, S., Farahani, J.N., 2015. Supplementary cementitious materials origin from agricultural waste-A review, *Constr. Build. Mater.* 74, 176-187.
- Baluch, H., Ziraba, Y.N., Azad, A.K., 1987. Fracture characteristics of sisal fibre reinforced concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9, 157-168.
- Binici, H., Eken, M., Dolaz, M., Aksogan, O., Kara, M., 2014. An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. *Construction and Building Materials*, 51, 24-33.
- Binici, H., Yuçegök, F., Aksogan, O., Kaplan, H., 2008. Effect of corncob, wheat straw and plane leaf ashes as mineral admixtures on concrete durability. *ASCE, Civ Eng Mater.*, 20, 478-483.
- Bolat, M., 2005. Use of biomass sources for energy in Turkey and a view to biomass potential. *Biomass Bioenergy*, 29, 32-41.
- Buari, T.A., Ademola, S.A. and Ayegbokiki, S.T., 2013. Characteristics Strength of groundnut shell ash (GSA) and Ordinary Portland cement (OPC) blended Concrete in Nigeria. *IOSR/JEN*, 3, 1-7.
- Canovas, M.F., Selva, N.H., Kawiche, G.M., 1992. New economical solutions for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibres. *Materials and Structures*, 25, 417-422.
- Chatveera, B., Lertwattanakul, P., 2009. Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 90, 1435-1441.
- Chatveera, B., Nimityongskul, P., Tansriprapasari, W., Seehabuth, P., 2005. Development of sisal fiber reinforced roofing sheets. *AGRI*, 4, 44-61.
- Chindaprasirta, P., Homwuttiwongb, S., Jaturapitakkulb, C., 2007. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. *Construction and Building Materials*, 21, 1492-1499.
- Chindaprasirta, P., Rukzona, S., Sirivivatnanonb, V., 2008. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 22, 932-938.
- Cook, D.J., 1984. Development of microstructure and other properties in rice husk ash-OPC systems. *Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 9th, 1984, Sydney, Australia, 355-360.
- Çimento Sektörü Raporu, 2018. Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü Sektörel Raporlar Ve Analizler Serisi, Çimento Raporu.
- Demir, İ., 2006. An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Building and Environment*, 41, 1274-1278.
- Demir, I., Baspınar M.S. and Orhan M., 2005. Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Building and Environment*, 40, 1533-1537.
- Demir, İ., 2008. Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*, 28, 622-627.
- Demirbas, A. and Aslan, A., 1998. Effects of ground hazelnut shell, wood, and tea waste on the mechanical properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 28, 1101-1104.
- Duggal, P., Yadav, B., Choudhry H., Springer, A. G. 2020. Comparative Analysis of Cement Mortar Roof Tiles Using Agricultural Waste. *Nature Singapore Pte, Advances in Structural Engineering and Rehabilitation, Lecture Notes in Civil Engineering*.
- Gündüzalp, A.A., Güven, S., 2016. Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*.

- Gürel B., 2020. Türkiye'deki güncel biyokütle potansiyelinin belirlenmesi ve yakılmasıyla enerji üretimi iyi bir alternatif olan biyokütle atıklar için sektörel açıdan ve toplam yanma enerji değerlerinin hesaplanması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(2), 407 – 416.
- James, J., Rao, M.S., 1986. Reactivity of rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, 16, 296–302.
- James, J., Rao, M.S., 1986. Characterization of silica in rice husk ash. *American Ceramic Society Bulletin*, 65, 1177–1180.
- Karade, S.R., 2010. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*, 24, 1323–1330.
- Kartalkanat, A., 2010. Çimento fabrikalarının çevreye muhtemel etkileri, online website. İnternet erişimi: <http://www.ovamadokunma.com/index.php/makaleler/okuyucu-makaleleri/105-cimento-fabrikalarnn-cevreye-muhtemel-etkileri>
- Khabir, L., Huda, M., Amin, R., Kamruzzaman, S., 2013. Energy Saving Brick from Rice Husk Ash. *International Conference Mechanical, Industrial and Materials Engineering, Rajshahi, Bangladesh*, 222-226.
- Khan R., Jabbar A., Ahmad I., Akhtar Naeem Khan A. N., 2012. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete, *Constr. Build. Mater.* 30, 360-365
- Khedari, J., Nankongnab, N., Hirunlabh, J. and S. Teekasap 2004. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, 39, 59–65.
- Khorami, M. and Ganjian E., 2011. Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, 25, 3661–3667.
- Kishore, R., Bhikshma V. and Prakash P.J., 2011. Study on Strength Characteristics of High Strength Rice Husk Ash Concrete. *Procedia Engineering*, 14, 2666–2672.
- Kraiwood, K., Chai, J., Smith, S., Seksun, C., 2001. A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*, 23, 335–343.
- Le H.T., Nguyen S.T., Ludwig H.-M., 2014. A study on high performance fine-grained concrete containing rice husk ash, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8 (4), 301-307.
- Lertsutthiwong, P., Khunthong, S., Siralermukul, K., Noomun, K. and Chandkrachang, S., 2008. New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. *Bioresource Technology*, 99, 4841–4845.
- Lima, P.R.L., Santos, R.J., Ferreira, S.R. and Tolêdo, F.R.D., 2014. Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. *Engenharia Agrícola*, 34, 812–825.
- Liu, D., Song, J., Debbie, P. A., Peter, R. C. and, Yan, H., (2012), Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties, *Cellulose* 19:1449–1480
- Mahmoud, H., Bebel, Z.A. and Nwakaire, C., 2012. Groundnut shell ash as a partial replacement of cement in sandcrete blocks production. *International Journal of Development and Sustainability*, 1, 1026–1032.
- Malhotra, V.M., Mehta, P.K., 2004. *Pozzolanic and cementitious materials*. Advances in concrete technology, Gordon and Breach Science Publishers.
- Mehta, P.K., 1978. Siliceous ashes and hydraulic cements prepared therefrom. US Patent 4105459A.
- Mehta, P.K., Folliard, K.J., 1995. Rice-husk ash-a unique supplementary cementing material. *Materials Science*, 154, 531–542.
- Nwofor, T.C. and Sule, S., 2012. Stability of groundnut shell ash (GSA)/ordinary portland cement (OPC) concrete in Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 3, 2283–2287.
- Oyetola, E. B. and Abdullahi, M., 2006. The Use of Rice Husk Ash in Low-Cost Sandcrete Block Production. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 8, 58–70.
- Öner, M.N.K., 2019. Tarım Atıklarının Geri Dönüştürülmesi: Yalova İli Tarımsal Atık Yönetimi, *Mühendislikte Yeni Yaklaşımlar*, s 86-97.
- Özyurt, H . 2020. Design and properties of composite sustainable building material by using waste (HDPE). *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 8 (3), 777-782 .
- Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruza, D., Varum, H. and Pinto, J., 2012. A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, 45, 274–279.
- Pappua, A., Saxenaa, M., Asolekarb, S.R., 2007. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*, 42, 2311–2320.
- Paya, J., Monzo, J., Peris-Mora, E., Borrachero, M.V., Tercero, R., Pinillos, C., 1995. Early-strength development of Portland cement mortars containing air classified fly ashes. *Cement and Concrete Research*, 25, 449–456.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Peris, E., Gonzalez-Lopez, E., 1997. Mechanical treatment of fly ashes. Part III: studies on strength development on ground fly ash cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 27, 1365–1377.
- Pereira, C.L., Savastano, H.Jr., Payá, J., Santos, S.F., Borrachero, M.V., Monzó, J. and Soriano, L., 2013. Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber. *Industrial Crops and Products*, 49, 88–96.
- Pinto, J., Vieira, B., Pereira, H., Jacinto, C., Vilela, P., Paiva, A., Pereira, S., Cunha, V.M.C.F. and Varum H., 2012. Corn cob lightweight concrete for non-structural applications. *Construction and Building Materials*, 34, 346–351.
- Pone, J., Ash, A., Kamau, J. and Hyndman, F., 2018, Palm Oil Fuel Ash as A Cement Replacement in Concrete. *Modern Approaches on Material Science*, 1, 4-8.
- Reddy, S., Reddy, R. and Songkasupa, P., 2018. Evaluation of Mechanical Properties of Cement Concrete Pavement Using Granite Dust and Baggage Ash. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13, 187–192.
- RILEM Committee 73-SBC, 1988. Final report: siliceous by-products for use in concrete. *Materials and Structures*, 21, 69–80.
- Sandermann W. and Kohler, R., 1964. *Holzforschung* 18, 53.
- Sangeetha, S. P., 2016. Rice Husk Ash Sandcrete Block as Low Cost Building Material. *Int. Journal of Engineering Research and Application*, 6, 46-49.
- Saraswathy, V. and Song, H., 2007. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. *Construction and Building Materials*, 21, 1779–1784.

- Sensale, G.R., 2006. Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement & Concrete Composites*, 28, 158–160.
- Sobuz, H. R., Hasan, N. Md. S., Tamanna, N. and Islam, S. 2014. Structural Lightweight Concrete Production by Using Oil Palm Shell. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Materials*, 2014, 1-6.
- Sooksanen, P., Boodpha, V., Janrawang, P. and Songkasupa, P., 2018. Fabrication of Lightweight Concrete Composites Using Natural Fibers in Thailand. *Engineering Materials*, 765, 305–308.
- Takano, R., Kayahara, M. and Nakagawa, H., 1977. *Fukui-Ken Mokuzai Shikenjo* 31, 1.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., 2007. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management*, 27, 81-88.
- Tangjuank, S., 2011. Thermal insulation and physical properties of particleboards from pineapple leaves. *International Journal of Physical Sciences*, 6, 4528–4532.
- Tolêdo, F.R.D., Kuruvilla J., Khosrow G. and England, G.L., 1999. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3, 245–256.
- Xu, J.Y., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G.P. and Kawai, S., 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50, 62–67.
- Yalinkilic, M.K., Imamura, Y., Takahashi, M., Kalaycioglu, H., Nemli, G., Demirci, Z., Ozdemir, T., 1998. Biological, physical and mechanical properties of particleboard manufactured from waste tea leaves. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 41, 75-84.
- Yashwanth, M.K. and Nagarjuna, P., 2016. An Experimental Study on Synergic Effect of Sugar Cane Baggage Ash and Fly Ash in Concrete. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 3, 174–178.
- Yoshizawa, S., Tanaka, M., Shekdar, A.V., 2004. Global trends in waste generation. *Recycling, waste treatment and clean technology*, 1541–1552.
- Zhou, X., Zheng, F., Li, H. and Lu, C., 2010. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42, 1070–1074.
- Zhou, X.Y., Li, J. and Zhou, D.G., 2004. Thermal transfer properties of low density wheat strawboard. *Journal of Nanjing Forestry University*, 28, 1–4.
- Zhu, W.H., Tobias, B.C., Coutts, R.S.P. and Langfors, G., 1994. Air-Cured Banana-Fibre-Reinforced Cement Composites. *Cement & Concrete Composites*, 16, 3-8.



SOFRALIK ZEYTİN ÜRETİMİNDEN KAYNAKLANAN ATIKSULARIN ÖZELLİKLERİ VE ARITMA YÖNTEMLERİ

Deniz DÖLGEN*, Mehmet Necdet ALPASLAN

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Sofralık Zeytin Atıksuyu, Salamura Atıksuyu, Yıkama Atıksuyu, Fenol, Kompleks Organik Bileşikler.</i>	Türkiye, zeytin üretiminde dünyanın önde gelen ülkelerinden biridir. Toplanan (hasat edilen) zeytinin yaklaşık %25'i sofralık zeytin olarak tüketilmekte, geri kalan %75'i zeytinyağı olarak işlenmektedir. Ülkemizde sofralık zeytin üretiminde farklı hazırlama yöntemleri (İspanyol tipi işlem, çizme ve kırma, salamura tipi, sele tipi, teneke tipi, kalamata tipi, kostikli tip, doğal fermente, vb.) kullanılmaktadır. Hazırlama yöntemine bağlı olarak atıksuyun miktar ve kalitesinde farklılıklar görülmekle birlikte, temelde sofralık zeytin üretimi (SZÜ) işlemlerinden yüksek organik madde, fenolik bileşikler, klorür, alkalinite, çözünmüş katı madde içeren koyu renkli atıksular oluşmaktadır. Bu nedenle, SZÜ atıksularının arıtılması için fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma süreçlerinin bir arada uygulandığı çözümler önerilmektedir. Türkiye'de SZÜ atıksularının arıtılmasına yönelik teknolojik uygulamalar sınırlıdır. Literatürde, laboratuvar ölçekli bazı çalışmaların sonuçları sunulmaktadır. Ancak, konuyu SZÜ süreçleri ve buna bağlı olarak atıksu kaynakları, atıksu miktarı, atıksu karakterizasyonu ve arıtma alternatifleri şeklinde tüm bileşenleri ile ele alan bir çalışma bulunmamaktadır. Makalede, önce SZÜ süreçleri ile üretimden kaynaklanan atıksuların miktar ve kalitesi hakkında kapsamlı bilgi verilmiştir. Daha sonra SZÜ atıksularının arıtımında öne çıkan yöntemler tanıtılmış, uygun arıtma kombinasyonları irdelenmiştir.

CHARACTERISTICS OF WASTEWATER GENERATED FROM TABLE OLIVE PRODUCTION AND TREATMENT METHODS

Keywords	Abstract
<i>Table Olive Wastewater, Fermentation Wastewater, Washing Wastewater, Phenol, Complex Organic Compounds.</i>	Turkey is one of the biggest olive producers in the world. Approximately 25% of harvested olive is consumed as table olive, and the rest 75% is used for olive oil production. Various methods (e.g. Spanish style, slit and crushed, salamura, sele, kalamata, caustic, natural fermented, etc.) are applied in table olive processing in Turkey. Table olive wastewater (TOWW) contains high organic matter, phenolic compounds, chloride, alkalinity, dissolved solids, and dark color, in general, however, the quantity and quality of the wastewater differs significantly depending on the production method. Therefore, combination of physical, chemical, and biological treatment methods is recommended for purification of the TOWW. In Turkey, technologic applications for the treatment of TOWW are limited. The results of some laboratory scale studies are presented in literature. However, there is no study addressing the subject with all its components (olive production processes, TOWW sources, wastewater quantity, wastewater characterization, and treatment alternatives). In the article, firstly, the comprehensive information about table olive production processes, quantity and quality of wastewater generated from olive production is introduced. Then, prominent methods on treatment of TOWW are presented, and appropriate treatment combinations are evaluated.

Alıntı / Cite

Dölgen, D., Alpaslan, M.N., (2020). Sofralık Zeytin Üretiminden Kaynaklanan Atıksuların Özellikleri ve Arıtma Yöntemleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1312-1323.

* İlgili yazar / Corresponding author: denizdolgen@gmail.com, +90-232-301-7139

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
D. Dölgen, 0000-0002-5888-3032	Başvuru Tarihi / Submission Date	27.07.2020
M.N. Alpaslan, 0000-0003-1895-7479	Revizyon Tarihi / Revision Date	19.10.2020
	Kabul Tarihi / Accepted Date	22.10.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Ülkemizde zirai-endüstrinin (agro-industry) önemli bileşenlerinden biri zeytinciliktir. Zeytin ve zeytin işleme faaliyetleri sonucunda elde edilen temel ürün sofralık zeytin ve zeytinyağıdır. Son yıllarda dünyada sağlıklı yaşam ve beslenmeye artan ilgi ile birlikte sofralık zeytin ve zeytinyağı üretim ve tüketiminin önemi de artmaktadır. Bu eğilimler, zeytinciliğin, sadece Akdeniz'e kıyı olan ülkelerde değil, Akdeniz iklimi gösteren Arjantin, Şili, Meksika, Peru, Avustralya vb. diğer ülkelerde de ekonomik anlamda tarımının yapılmaya başlanmasına neden olmuştur (IOC 2019; Papadaki vd., 2016). Türkiye, bulunduğu coğrafi konum ve sahip olduğu Akdeniz iklimi özellikleriyle İtalya, İspanya, Yunanistan ve Tunus gibi diğer Akdeniz ülkeleriyle birlikte dünyanın önde gelen zeytin ve zeytinyağı üreticilerindedir (Cillidag, 2013). Küresel zeytin üretiminin yaklaşık %15,2'sinin gerçekleştirildiği ülkemizde dünyadaki gelişmelere paralel olarak ülkemizde de son on yıllık dönemde zeytin üretimi, tüketimi ve ihracatında ciddi artışlar görülmüştür. Ulusal Zeytin ve Zeytinyağı Konseyi verilerine göre, 2019-2020 döneminde zeytin üretiminin tahmini olarak 1,5 milyon ton olacağı bunun yaklaşık 414 bin tonunun yemeklik (sofralık) olacağı öngörülmektedir (UZZK 2019). Akılcı politikalar ve desteklerle zeytin tarımına olan ilginin artarak devam etmesi, üretim ve ihracatında artış sağlanması beklenmektedir.

Zeytin meyvesi içerdiği yağ, aminoasitler, temel yağ asitleri, mineraller ve fenolik bileşikler yönünden zengin bir besin maddesidir. Sofralık zeytin ve zeytinyağı üretiminde uygulanan işlemler sonucunda, zeytin meyvesinin içindeki bileşenler suya geçmekte ve organik bileşikler, yağ, fenolik bileşikler bakımından yoğun kirlilik içeren atıksu oluşturmaktadır. Ayrıca, zeytin üretiminin sezonluk yapılması, ürünün talebe göre piyasaya sunulması, üretim şekli gibi koşullara bağlı olarak miktar bakımından da önemli değişkenlik göstermektedir. Miktar ve kalite bakımlarından sahip olduğu özellikler nedeniyle, sofralık zeytin ve zeytinyağı üretim süreçlerinden kaynaklanan atıksuların yönetimi için yetkin mühendislik uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu süreçte atıksuyun miktar ve karakterizasyonunun belirlenmesi, uygun arıtma proseslerinin seçimi, uygun ekipman ve malzemenin kullanılması, bilinçli işletim gibi konuların tümü önemli olmaktadır.

Zeytin ve zeytinyağı üretiminin dünyada sınırlı alanlarda ve ülkelerde yapılması, üretim süreçlerinden çıkan atıksuların arıtılması ile ilgili çalışmalara ve gelişmelere de belli bir sınır getirmektedir. Bu konuda, literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında İspanya, Yunanistan, Fransa, İtalya, Tunus, İsrail, Fas gibi ülkelerin ağırlıklı olduğu görülmektedir. Konu itibarıyla üretim süreçlerinden kaynaklanan atıksuların karakterizasyonu, arıtma alternatifleri, yaşam döngüsü analizi ve atık olarak çıkan malzemelerin değerlendirilmesiyle alakalıdır. Bunlar arasında, yeşil ve siyah zeytin ile doğal fermente zeytin üretiminden kaynaklanan atıksu miktarı ve özellikleriyle ilgili çalışmalar ağırlıklıdır. Arıtma alternatifleri konusunda ise genelde laboratuvar veya pilot ölçekli araştırmalara dair veriler sunulmaktadır. Son dönemlerde, atıksu karakterizasyonu ve arıtım dışında, döngüsel ekonomi ilkeleriyle paralel olarak atıkların değerlendirilmesine yönelik araştırmalar da görülmektedir. Türkiye önemli bir zeytin üreticisi ülke olmakla birlikte, atıksu yönetimine ilişkin çalışmalar, genelde zeytinyağı üretimi konusundadır. Sofralık zeytin üretimi (SZÜ) alanında ulusal çalışmalar çok kısıtlıdır. Bu ihtiyaçtan hareketle, sunulan çalışmada, kapsamlı bir araştırma yapılarak, öncelikle dünyada ve ülkemizde uygulanan sofralık zeytin üretim süreçleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üretimden kaynaklanan atık suların niceliği (miktarı) ve niteliği (karakterizasyonu) üretim yöntemleri göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. SZÜ atıksularının arıtılmasına yönelik önerilen sistemler incelenmiş, çalışma prensipleri, verimlilikleri, işletim özellikleri gibi bakımlardan tartışılmış, çözüm önerileri sunulmuştur.

2. Sofralık Zeytin Üretimi (Table Olive Production)

Sofralık zeytin (SZ), işlenebilecek olgunlukta hasat edilen zeytin meyvelerinin acılığının giderilip, yenilebilir olgunluğa gelmesiyle elde edilen bir üründür. Ülkemizde temelde "yeşil" ve "siyah" olmak üzere iki tür sofralık zeytin üretiminden söz edilmekle birlikte, uygulanan işleme tekniğine göre piyasaya farklı isimlerde sunulan ürünler (örneğin çizme, kırma, sele, hurma, kalamata, vb.) bulunmaktadır. Gerek siyah gerek yeşil zeytin üretiminin ana işlemi, zeytin meyvesine acılık tadını veren oleuropein maddesinin giderilmesidir. Acılık alma olarak isimlendirilen işlem alkali madde kullanılarak veya alkali madde kullanılmadan (sadece fermantasyon ile) gerçekleştirilebilir (Cillidag, 2013; Gomez vd., 2006). Alkali uygulamasında kostik (NaOH) eklenir, zeytin meyveleri seyreltik kostik çözeltisi içeren tanklarda bekletilir. Fermantasyon uygulaması ise zeytin meyvelerini asitli su, tuzlu su içinde bekletmek, doğrudan tuz ile temas ettirmek veya tuzlu suya hava vererek yapılabilir (Cillidag, 2013; Gomez vd., 2006; Papadaki vd., 2016).

SZ üretiminde kullanılan hazırlama işlemlerini üç grupta ele almak mümkündür. Bunlar, (1) alkali işlem görmüş zeytin- İspanyol usulü yeşil zeytin, (2) tuzlu suda işlem görmüş siyah zeytin- Kaliforniya tipi siyah zeytin ve (3) doğal fermantasyonla üretilen işlem görmemiş zeytindir (Yunan tipi). Ülkemizde bu üç üretim yöntemi geçerli olmakla birlikte, yeşil zeytin üretiminde İspanyol tipi üretim dışında kırma ve çizme yeşil zeytin hazırlama işlemleri de kullanılmaktadır. Benzer olarak, siyah zeytin üretiminde de, tuz katlama, konfit uygulama, hava vererek tatlandırma gibi uygulamalar yer almaktadır.

2.1. Yeşil zeytin işleme yöntemleri (Green olives processing methods)

Yeşil zeytin üretiminde meyvelerinin hasadı, bölgelere göre değişiklik göstermekle birlikte, genelde eylül-ekim aylarında olmaktadır. Meyvelerin zarar görmeden mümkünse el ile toplanması tavsiye edilir. Hasat edilen zeytinler tahta veya plastik küfelerde kamyonlar ile işleme yerlerine iletilir (Balatsorus vd., 1997). İlk olarak, zeytin meyvesinin bünyesindeki oleuropeinin giderilmesi için seyreltik (%2.0-5.0 w/v) kostik (NaOH) kullanılır (Charoenprasert vd., 2014; Sanchez vd., 2014; Cillidag, 2013; Parinos vd., 2007; Gomez vd., 2006; Rejano ve Garrido, 2004). Acılık giderme işlemi, toprak altında kullanılan fermantasyon tankları veya yer üstündeki polyester tanklarda gerçekleştirilir. Kostik ile muamele işlemi 6-15 saat sürer, alkali çözeltinin zeytinin etli kısmına büyük oranda işlemesi sağlanır (Gomez vd., 2006; Rejano ve Garrido, 2004). Ancak, fermantasyon aşamasında laktik asit bakterilerinin gelişimini desteklediği için, çekirdeğin etrafında kostikten etkilenmemiş bir kısmın kalması da istenir (Balatsorus vd., 1997). Bu nedenle, kostik, zeytin etinin istenen derinliğine ulaştığında, yıkama işlemi uygulanır. Yıkama işleminin zeytin etindeki bütün fermente olabilir maddeleri, mineralleri kaybedecek kadar uzun olmaması önerilir (Fendri vd., 2013; Therios, 2009; Fernández vd., 1997). Deneyimler yıkama işleminin 12-14 saatte tamamlanması, 3 kez su değiştirilmesinin yararlı olduğu yönündedir.

Yıkama işleminden sonra zeytinler fıçılara konur, üzerleri tuzlu su ile (salamura) örtülür. Salamura tuz, su ve koruyucular içeren, zeytinin tatlanması ve ambalajda bozulmamasını sağlayan bir çözeltidir (%10w/v). Zeytin meyvelerinin bünyesindeki su ozmoz yoluyla salamuraya geçer ve fermantasyon için gerekli şeker, protein vb. maddelerle zenginleşir. Böylece mikroorganizma faaliyetlerine elverişli duruma gelir ve anaerobik koşullarda fermantasyon süreci gerçekleşir. Fermantasyon, zeytin mikroflorasında mevcut yararlı mikroorganizmaların zeytin etindeki serbest şekerleri parçalayarak laktik asit oluşturmaları sonucu zeytinin yenilebilir hale gelmesini sağlar (Balatsorus G., 1997). Fermantasyon için havasız koşulların temin edilmesi, acılık giderme işlemi sonrası laktik asit bakterileri için yeterli miktarda besin-şeker bulunması (yetersiz ise dışarıdan eklenmeli) ve uygun bakteri (laktik asit bakterileri) gereklidir (Polonio vd., 2015; Parinos vd., 2007).

Şeker, fermantasyonu sağlayan mikroorganizmalar için temel besin kaynağıdır. Mikroorganizmaların şekeri kullanarak oluşturduğu asit, zeytinlerin bozulmasını önlemekte ve yeme olgunluğuna gelmesini sağlamaktadır. Fermantasyon sürecinde, ham zeytine acı tadı veren oleuropein yavaş yavaş parçalanır. Oleuropeinin parçalanması sonucu oluşan kullanılabilir şekerler salamuraya geçerken, zeytin meyvelerinin bünyesine tuz alınır. Fermente olmuş zeytinler organoleptik özelliklerinin gelişmesi için 2 aya kadar uzayabilen sürelerde muhafaza edilir, salamurası alınır, seçilir ve ambalaja girer. Şekil 1'de İspanyol tipi yeşil zeytin üretim süreci şematik olarak gösterilmiştir.

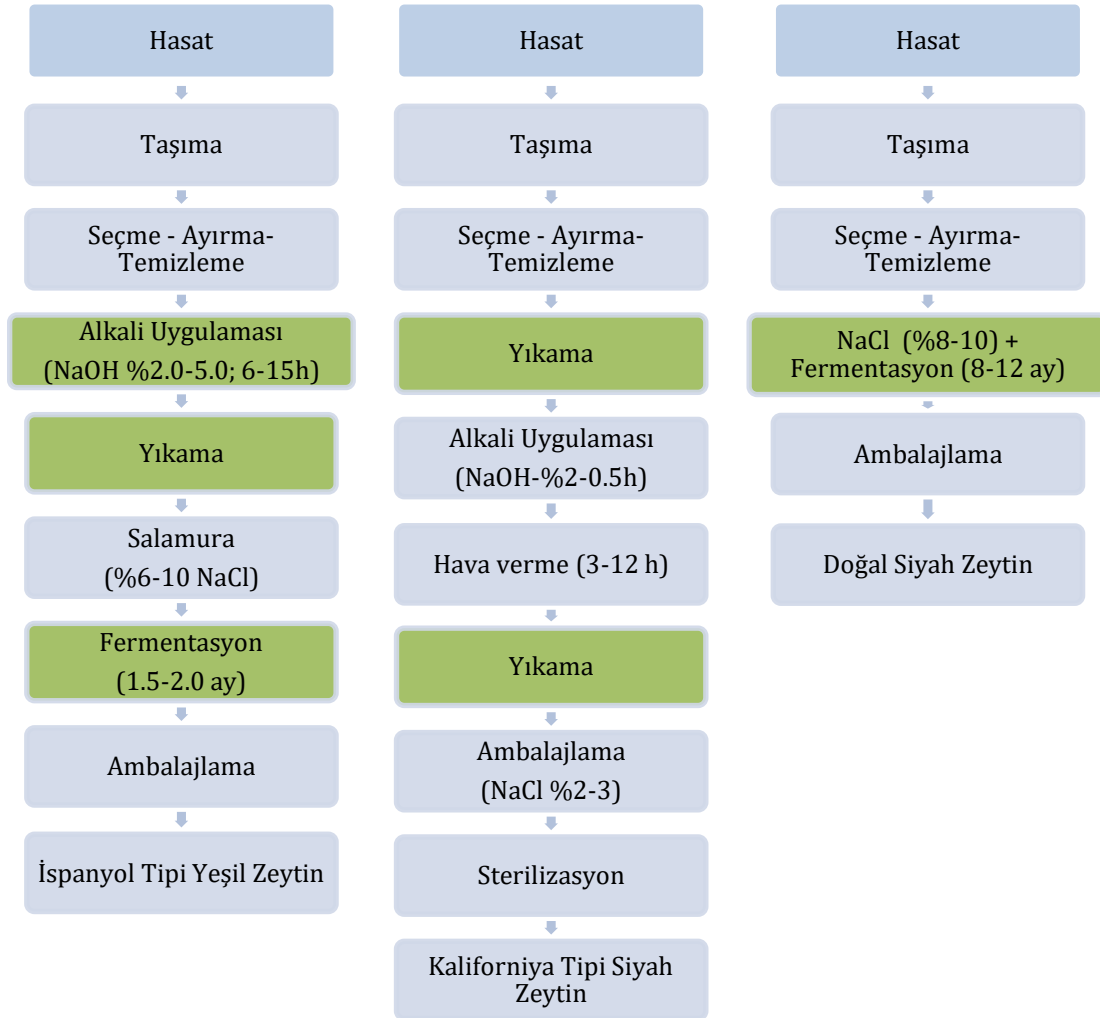
Ülkemizde sofralık yeşil zeytin üretiminde gerek İspanyol tipi işlem gerekse de çizme ve kırma zeytin işleme teknolojileri kullanılmaktadır. İspanyol tipi üretimde, hasat edilen zeytinler %1- 2,5'lik NaOH çözeltisi içerisinde (danenin 2/3 üne işleyene kadar) bekletilir. Ardından yıkama işlemi uygulanır; bu kapsamda 4-6 saat arayla 4-6 yıkama yapılır. Ardından salamura içerisinde bekletilir ve 1-3 aylık süre zarfında fermantasyon tamamlanır. Olgunlaşan zeytinler pastörize edilerek piyasaya sunulur. Çizme zeytin işleme yöntemi, acılık giderme dışında İspanyol yöntemine benzer. Ancak, alkali işlem uygulanmaz. Yıkama işlemi sonrasında meyveler 2-3 yerinden çizilerek %2-3 salamuraya (tuz ve limon tuzu) konur. Haftada 1-2 kez suyu değiştirilir. Acılığı giderilen (tatlanan) zeytinler %7'lik salamuraya konularak 1-2 ay fermantasyona tabi tutulur. Yeme olgunluğu kazanan zeytinler ambalajlanarak piyasaya sunulur. Kırma tipi zeytin ise, çizme yönteminde olduğu gibi hazırlanır. Ancak, zeytinler doğal yapısı bozulmayacak şekilde kırılır veya iğneyle delinir. Acılığın giderilmesi yine çizme zeytininde olduğu gibi yapılır.

2.2. Siyah zeytin işleme yöntemleri (Black olives processing methods)

Sofralık siyah zeytin salamura tipi, sele tipi, teneke tipi, kalamata tipi, kostikli tip olmak üzere çeşitli hazırlama yöntemlerine göre üretilmektedir. Literatürde genel olarak Kaliforniya tipi üretim şekli tanınmakla birlikte ülkemizde sele tipi, teneke tipi, kalamata tipi, kostikli tip sofralık siyah zeytin üretimi de yapılmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen Kaliforniya tipi üretim (tuzlu suda işlem görmüş siyah zeytin) günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Balatsorus G., 1997). Şekil 1'de şematik olarak gösterilen Kaliforniya tipi üretim sürecinde zeytin meyveleri kırmızı iken yani henüz tam olgunlaşmadan toplanır ve işleme tesisine iletilir. Ön işlem olarak 2-6 ay süre ile seyreltik tuzlu suda bekletilir. Tanelerin seçim ve tasnif işleminden sonra birkaç seyreltik alkali çözelti ile acılığının alınması ve oksidasyon ile renklerinin koyulması sağlanır.

Genellikle 3 veya daha çok kostik çözeltisi, azalan konsantrasyonlarda uygulanır (%2-5) (Fernandez A.G, 1997). İlk muamele işlemi alkali çözelti zeytin kabuğuna işleyene kadar yapılır. Ünlform bir renk için ya karışım işlemi uygulanır veya basınçlı hava verilir. Bu işlem zeytin tek düze siyah bir renk alana kadar sürer (3-12 saat). Sonraki alkali uygulama işlemleri alkali madde zeytin etine ve çekirdeğe geçene kadar devam eder. Her muamele sonrasında havalandırılır. Karartma işleminden sonra zeytinler yıkanır ve alkali madde uzaklaştırılır. Zeytinlerin oksidasyon sonucunda karararı rengi kararlı olmayıp bozulabilir. Bunu düzenlemek için demir glukonat, demir (II) laktat eklenebilmektedir. Yaklaşık 24 saat demir bileşikler i içeren çözeltide bekletildikten sonra yıkanan zeytinler seyreltik tuzlu suda 1 hafta tutulur. Sonrasında tenekelere konulup üzer i tuzlu su ile doldurulur, sterilizasyon amacıyla ısıtılır (4-5 dakika).



Şekil 1. Sofralık zeytin üretim süreci akım şeması (Flowsheet of table olives production process)

Ülkemizde Kaliforniya tipi imalatın örneği kostikli tip (konfit) sofralık siyah zeytin üretimidir. Piyasaya istenilen zamanda ürün verebilmek amacıyla tercih edilen çabuk yöntemde (konfit tipi) %1,5-2 oranında kostik çözeltisi kullanılır. Kostik zeytin etinin 3/4 üne işlediğinde kostik çözeltisi boşaltılır ve zeytinler havalandırılarak yıkanır (4 kez). Bu tip hazırlanan zeytinler düşük tuz ile hazırlanan ambalaj salamurası içerisinde pastörizasyon yada sterilizasyon işleminden geçirilir. Isıl işlemden geçirme imkanı yoksa koruyucu maddeler ilave edilerek hazırlanmış zeytinler %10'luk ambalaj salamurasının içerisinde piyasaya sunulur.

2.3. İşlem görmemiş siyah zeytin üretimi (Naturally processed black olives production)

Doğal fermente zeytin üretiminde meyvelerin hasadı tam olgunlukta veya biraz öncesinde başlar. Ekim ayı ortalarından başlayıp aralık ayına değin sürer. Toplanan zeytinler, delikli küfelerde hava alması sağlanarak kamyonlar ile işleme tesislerine iletilir. Tesiste önce kusurlu meyveler ayıklandıktan sonra yıkanır ve fermantasyon tanklarına alınır. Doğal fermantasyon, acılık giderme işlemi uygulanmadan zeytinlerin doğrudan salamuraya alınması ile gerçekleşir. Bu işlemde fermantasyon ve acılığın giderimi için en önemli husus salamuradaki tuz içeriğidir. Bu nedenle tuz içeriğinin yüksek olması tercih edilir (%8-10 w/v). Doğal fermantasyonda zeytinler kostik ile işlem görmediğinden tuzlu suyun zeytin etine geçişi, zeytin etindeki bileşiklerin suya geçişi ve dengeye ulaşması daha uzun sürer. Doğal fermantasyonda zeytinin acılığının giderimi oleuropeinin tuzlu suda çözünmesiyle sağlanır ve 8-12 ay kadar sürer (Gomez vd., 2006; Balatsorus G., 1997). Fermantasyon süreci temmuz ve ağustos başına kadar devam edebilir. Fermantasyonu tamamlanan zeytin tanelerindeki renk farklılıklarını gidermek üzere havalandırma uygulanır (24-48 saat); böylelikle zeytin tanelerinin oksidasyonu, renginin koyu ve kararlı (stabil) olması sağlanır. Takiben ambalajlanarak tüketiciye sunulur. Şekil 1'de doğal fermente zeytin üretim süreci şematik olarak gösterilmektedir.

Ülkemizde Gemlik yöntemi olarak bilinen üretim doğal fermantasyon uygulamasıdır. Zeytinler beton, polietilen, polyester ve fiberglas tanklarda, %10'luk salamurada bekletilir. Tuz konsantrasyonu azaldıkça eklenmesi gerekir. Ülkemiz iklim koşullarında zeytinler 6-9 ayda yeme olgunluğuna gelir. Bu yöntemin bir başka uygulama şekli ise tuz-katlama yöntemidir. Ege ve Marmara Bölgesindeki üreticilerin birçoğu tarafından kullanılmaktadır. Uygulamada zeytinler fermantasyon tanklarına bir kat tuz, bir kat zeytin olacak şekilde yerleştirilir. Zeytinlerin üzeri kapak ile kapatılır. Kapak üzerine zeytin ağırlığının %10-15'i oranında ağırlık konur. Zeytinlerin yeme olgunluğuna erişmesi çeşide ve olgunluğa bağlı olmakla birlikte 6-12 ay arasında gerçekleşir. Fermantasyon süresince tankın altında biriken tuzlu sular boşaltılıp hazırlanan %13-15'lik yeni tuzlu su ile fermantasyona devam edilebilir; yada altta biriken tuzlu sular geri devir ettirebilir. Gerekliyorsa yeni tuzlu su ile takviye edilir.

3. Atıksu Özellikleri (Wastewater Characteristics)

Sofralık zeytin üretimi atıksuların arıtımı için uygun yöntemin seçilmesinde ve tesisin tasarımında atıksu miktarının ve atıksu özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Atıksu miktarı ve karakterizasyonu, uygulanan üretim yöntemine göre değişkenlik gösterebilir. Sofralık zeytin üretiminde genel olarak acılık alma ve fermantasyon işlemlerinden atıksu oluşmaktadır. Bu bölümde yukarıda açıklanan üç üretim yöntemi esas alınarak atıksu oluşumu ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Atıksuyun oluştuğu ana işlemler Şekil 1 üzerinde yeşil renklendirme ile gösterilmiştir.

3.1. İspanyol tipi yeşil zeytin üretiminden kaynaklanan atıksuların özellikleri (Wastewater characteristics of Spanish style green olives production)

İspanyol tipi yeşil zeytin üretiminde atıksu, acılık alma işleminde tankların boşaltılması ve yıkanması ile fermantasyon tanklarının boşaltılmasından oluşur. Literatürde birim üretim başına 3,5-4,0 litre mertebesinde atıksu meydana geldiği belirtilmektedir (Cappelletti vd., 2011, KopsidasG.C., 1992). Yıkama işleminden genelde daha fazla atıksu oluşur (2.0-2.5 L atıksu/kg zeytin). Fermantasyon tanklarının boşaltılmasından ise daha düşük hacimde (0.5-1.0 L atıksu/kg zeytin) atıksu kaynaklandığı raporlanmaktadır (Papadaki vd., 2016).

Atıksu oluşumu, zeytin üretim süreçlerine bağlı olarak kesiklilik ve/veya süreklilik göstermektedir. İspanyol tipi yeşil zeytin üretiminde, kostik çözeltisi eklenerek uygulanan alkali işlemlerden, yılda sadece 1-2 ay süre ile kostikli atıksu (lye-debittering) ve yıkama suları oluşur. Buna karşın, tuzlu fermantasyon suları ise yıl boyunca meydana gelebilir.

Gerek kostik ile alkali işlemde kaynaklanan atıksular ile yıkama suları gerek fermantasyon atıksuları özellik bakımından da birbirinden oldukça farklılık gösterir. İspanyol tipi yeşil zeytin üretimi atıksularının içerdiği bazı kirlilik parametreleri ve konsantrasyonları Tablo 1'de özetlenmiştir. Fermantasyon öncesinde acılık alma amacıyla kullanılan kostik nedeniyle yıkama işleminden yüksek alkaliniteye sahip atıksu kaynaklanır. Buna karşın, fermantasyon sırasında mikroorganizmaların zeytin etindeki serbest şekerleri parçalayarak laktik asit oluşturmaları sonucunda asidik özellikte atıksu oluşur. Ayrıca, zeytinlerin salamuraya bırakılmasından ötürü, atıksudaki çözünmüş tuz miktarı artar, dolayısıyla elektriksel iletkenlik yükselir. Sofralık zeytin üretim süreçlerinden oluşan atıksuların organik madde konsantrasyonu da oldukça yüksektir. Konsantrasyon olarak 35.000 mg KOİ/L mertebesine erişebilmektedir (Papadaki ve Mantzouridou, 2016). Atıksudaki yüksek konsantrasyonlardaki fenolik bileşikler temelde biyolojik arıtma açısından sorun oluşturabilmekte; bu nedenle ilave işlemler gerektirmektedir. Yıkama sırasında zeytinlerde fenolün hidrolize olması sürdüğünden, yıkamadan

kaynaklanan atıksulardaki fenol konsantrasyonunun, alkali işlem atıksuyundan biraz daha fazla olduğu ifade edilmektedir (Deligiorgis A., 2008; Chatzisyneon vd., 2008; Kopsidas, 1992; Gomez vd. 2006).

Alkali işlemler ve fermantasyon işlemlerinden farklı özellikte ve miktarlarda atıksu oluştuğundan ayrı toplanması önerilmektedir. Ayrıca, son yıllarda, atıksuyun geri kullanılması sağlanarak çevresel etkileri azaltılmaya çalışılmaktadır. Mevcut endüstriyel ölçekli uygulamalarda 5-7 kez geri döndürülerek kullanıldığı örnekler yer almaktadır (Gomez vd., 2006). Yıkama işleminde uygulanan güncel yaklaşım 12-15 saat süren tek yıkama şeklindedir. Ayrıca, yıkama işleminde bölgesel olarak da farklılık görülebilmektedir. Örneğin İspanya'da az sayıda yıkama işlemi uygulanırken, ülkemizde daha fazla yıkama uygulanarak acılık tadının giderilmesi tercih edilmektedir.

Tablo 1. İspanyol tipi yeşil zeytin atıksuyu özellikleri (Papadaki ve Mantzouridou, 2016) (Wastewater characteristics of Spanish style green olives)

Parametre	Acılık Alma		Yıkama		Fermantasyon	
	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık
pH	12,1	9,5-13,2	10,0	7,2-11,5	4,0	3,6-4,6
E.İletkenlik (mS/cm)	12,1	11,1-13,0	10,2	-	81,4	53,1-94,2
KOİ (g/L)	18,8	9,4-35,0	16,1	0,3-35,0	15,9	6,8-26,0
BOİ (g/L)	9,5	3,1-20,0	11,0	0,1-21,0	10,6	2,2-20,0
T.Fenolik Bileşikler (g/L)	1,78	0,21-4,00	2,32	0,45-4,00	2,78	0,18-6,00
Çöz. Org. Katı M. (g/L)	21,9	13,1-30,0	24,2	19,1-30,0	18,8	13,6-25,2
Çöz. İnorg. Katı M. (g/L)	21,9	15,4-35,0	20,0	6,8-54,3	73,9	20,9-110,0
T. Askıda Katı M. (g/L)	2,03	0,10-3,42	0,07	0,03-0,10	0,81	0,08-2,00
Toplam K. Azotu (g/L)	0,58	0,50-0,75	-	-	0,32	0,27-0,36
Klorür (g/L)	0,32	0,00-0,60	0,30	0,00-0,60	49,1	36,4-62,7

3.2. Kaliforniya tipi siyah zeytin üretiminden kaynaklanan atıksuların özellikleri (Wastewater characteristics of Californian style black olives production)

Siyah zeytin üretiminden temelde alkali tankların boşaltılması ve yıkanması (acılık alma) işlemlerinden atıksu oluşmaktadır. Zeytinlerin, renginin karartılması için, demir glukonat çözeltisinde bekletilmesi durumunda da tanklardaki suyun boşaltılması ve tankların yıkanmasından atıksu oluşmaktadır. Kaliforniya tipi üretimde, birim zeytin üretimi başına yaklaşık 6 litre mertebesinde atıksu üretildiği belirtilmektedir (Cappelletti vd., 2011; Kopsidas, 1992). Atıksuyun yaklaşık yarısı (3-3,5 L/kg zeytin) yıkama işleminden kaynaklanmaktadır. Alkali çözelti ve fermantasyon tanklarının boşaltılmasından daha düşük oranda atıksu oluştuğu raporlanmaktadır. Alkali çözelti ve fermantasyon tanklarının boşaltılmasından kaynaklanan atıksu miktarlarının sırasıyla 1-1,5 ve 0,5-1,0 Litre mertebelerinde olduğu ifade edilmektedir (Cappelletti vd., 2011; Kopsidas, 1992).

Kaliforniya tipi siyah zeytin üretiminden kaynaklanan atıksuların içerdiği bazı kirlilik parametreleri ve konsantrasyonları Tablo 2'de özetlenmiştir. Siyah zeytin üretiminden temelde yüksek alkaliniteli, çözünmüş katı madde, organik madde ve fenolik bileşikler bakımından zengin atıksular oluşmaktadır.

Tablo 2. Kaliforniya tipi siyah zeytin atıksuyu özellikleri (Papadaki ve Mantzouridou, 2016) (Wastewater characteristics of Californian style black olives)

Parametre	Acılık Alma		Yıkama		Glukonat Çözeltisi
	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama
pH	11,89	11,7-12,11	9,93	6,90-13,6	3,7
KOİ (g/L)	2,4	2,0-2,6	4,1	3,5-6,7	1,5
BOİ (g/L)	-	-	3,1	1,4-5,0	-
T.Fenolik Bileşikler (g/L)	0,42	0,18-0,59	0,29	0,12-0,64	0,8
Çöz. Org. Katı M. (g/L)	14,5	12,1-19,3	24,0	3,1-36,6	43,4
Çöz. İnorg. Katı M. (g/L)	4,5	2,4-6,9	6,2	3,2-8,1	7,3
Toplam K. Azotu (g/L)	-	-	25,0	-	-

3.3. Doğal Fermantasyon Zeytin Üretiminden Kaynaklanan Atıksuların Özellikleri (Wastewater characteristics of naturally processed olives production)

Doğal fermantasyon ile zeytin (doğal siyah veya yeşil zeytin) üretiminden atıksu oluşumu sadece fermantasyon yada bazı durumda paketleme öncesi yıkamadan kaynaklanmaktadır. Miktar olarak daha az hacimdedir. Literatürde fermantasyon tanklarının boşaltılmasından oluşan atıksuyun 0,5-1,0 L/kg zeytin mertebesinde olduğu

belirtilmektedir (Deligiorgis A., 2008; Kopsidas, 1992; Fernandez vd., 1978). Kostik ile muamele uygulanmadığından alkali özellikte atıksu oluşmamakta; ancak salamura işleminden elektriksel iletkenliği ve çözünmüş organik madde içeriği yüksek atıksu kaynaklanmaktadır. Ayrıca, diğer zeytin üretim süreçlerinde olduğu gibi doğal fermente zeytin üretiminden de organik madde ve fenolik bileşikler bakımından yüksek kirliliğe sahip atıksular meydana gelmektedir.

Tablo 3. Doğal fermente siyah zeytin atıksuyu özellikleri (Papadaki ve Mantzouridou, 2016) (Wastewater characteristics of naturally processed olives)

Parametre	Fermentasyon / Yıkama	
	Ortalama	Aralık
pH	4,31	3,6-5,0
E.İletkenlik (mS/cm)	111,5	-
KOİ (g/L)	32,3	11,0-60,0
BOİ (g/L)	24,0	3,0-38,3
T.Fenolik Bileşikler (g/L)	4,3	3,2-5,2
Çöz. Org. Katı M. (g/L)	101,3	95,3-118,8
T. Askıda Katı M. (g/L)	0,13	0,1-0,15
Klorür (g/L)	39,4	33,3-45,5

4. Arıtma Yöntemleri (Treatment Methods)

Literatürde, SZÜ atıksularının arıtımı için farklı yöntemler önerilmektedir. Bunlar, kimyasal (koagülasyon-flokülasyon, elektro koagülasyon, ileri oksidasyon), biyolojik (aerobik ve anaerobik) ve fiziksel (membran ve buharlaştırma) yöntemler olup, tekil veya bileşik olarak uygulanabilmektedir. Bu bölümde, literatürde sunulan çalışmalardan yola çıkarak, SZÜ atıksularının arıtılması amacıyla uygulanabilecek yöntemler kısaca tanıtılmıştır.

4.1. Kimyasal Arıtma (Chemical Treatment)

Kimyasal arıtma süreçleri, tek başına veya biyolojik arıtma süreçlerinin etkinliğini arttırmak amacıyla, biyolojik arıtmanın önünde veya sonunda kullanılabilir. Bu kapsamda konvansiyonel koagülasyon ve flokülasyon, elektrokoagülasyon, ileri oksidasyon (ozonlama, UV radyasyonu, fotokataliz, fenton prosesi, ıslak hava oksidasyonu, vb.) ve adsorpsiyon gibi kimyasal proseslerden söz edilebilir.

Koagülasyon ve flokülasyon sürecinin temel prensibi, atıksuda elektrostatik yükleri sebebiyle bir araya gelemeyen partiküllerin (kolloid), kimyasal madde ilavesiyle daha büyük yumaklar şeklinde sudan uzaklaştırılmasıdır. SZÜ atıksuyunda, kolloidlerin yanı sıra büyük oranda çözünmüş organik bileşikler bulunduğundan, koagülasyon ve flokülasyon prosesi genelde tek başına yeterli olmayabilmektedir. Arıtma veriminin yanı sıra, kimyasal madde tüketimi, pH ayarlama, yüksek miktarda çamur oluşumu, özenli işletme ihtiyacı gibi özellikleri de sürecin bazı olumsuz yönleridir.

Elektrokoagülasyon (EC) prosesi, kolloidlerin elektriksel yüklerden etkilenmesi prensibine dayanmaktadır. Kimyasal koagülasyon ve flokülasyon prosesine göre daha az çamur oluşumu, kimyasal madde kullanılmaması, kompleks organik bileşikler okside ederek daha etkin giderim sağlanması gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Son yıllarda, EC yönteminin, özellikle kalıcı organik bileşikler içeren atıksuların arıtılmasındaki uygulamaları dikkat çekmeye başlamıştır (Türkay vd., 2018; Long vd., 2015; Lutke-Eversloh vd., 2015). SZÜ atıksuları da içerdiği organik ve fenolik bileşikler bakımından EC uygulamalarına potansiyel teşkil edebilir. Salameh (2015) Al ve Fe elektrotlar kullanarak zeytinyağı atıksuyunun arıtımını araştırmış, %47 mertebesinde KOİ giderimi elde etmiştir. Titanyum-Tantal-Platinyum-İridyum'un anot olarak kullanıldığı bir başka çalışmada, 8 saatlik sürede KOİ'de %71 oranında giderim belirlenmiştir (Giannis vd., 2007). Titanyum-Tantal-Platinyum-İridyum anotlarıyla, kısa arıtma süresinde fenollerin tamamının, uzun arıtma süresinde KOİ'nin %40 oranında giderildiği bulunmuştur (Gotsi vd., 2005). Dikici (2017) Al elektrotlar ile yaptığı çalışmada KOİ, fenol ve renk giderimlerini sırasıyla %34, %22 ve %80 oranında elde etmiştir. Antonin ve arkadaşları (2015) bor katkılı elmas (BKE) kaplı elektrotların hidroksil radikali üretme potansiyelinin ve stabilitesinin diğer malzemelere göre yüksek olduğunu göstermiştir.

İleri oksidasyon prosesleri (İOP), kimyasal arıtma yöntemleri arasında dikkat çeken uygulamalardan bir başkasıdır. Atıksuda bulunan toksik bileşiklerin biyolojik süreçleri olumsuz etkilemesi durumunda İOP uygulanmakta, böylelikle parçalanması zor organik bileşiklerin ayrıştırılması sağlanmaktadır. İOP yöntemleri arasında ozonlama, UV radyasyonu, fotokataliz, fenton prosesi (hidrojen peroksit/demir oksidasyonu), ıslak hava oksidasyonu (WAO) ve bunların kombinasyonları sayılabilir.

Ozon kullanılarak yapılan oksidasyonun, acılık alma (debitting) ve yıkama işleminden çıkan atıksuyun arıtılması

için uygun olduğu belirtilmektedir. Siyah zeytin yıkama suları için sadece ozon kullanılması neticesinde %50 KOİ, %75 fenol ve %65 aromatik bileşiklerin azaldığı görülmüştür. Ozon ile birlikte UV veya hidrojen peroksit gibi oksidanların uygulandığı durumlarda arıtma verimi artmış, %80-90 mertebesinde KOİ giderimi elde edilmiştir (Benitez vd., 2002; Beltran vd., 2000). UV radyasyon yöntemi ozon veya hidrojen peroksit gibi oksidanlarla birlikte uygulandığında, hidroksil radikallerinin artmasına neden olduğu için daha etkin sonuç vermektedir. Benitez ve arkadaşlarının (2001) siyah zeytin atıksuyu ile yaptıkları çalışmada sadece UV kullanılması ile %35 oranında KOİ giderimi elde edilmiştir. UV + hidrojen peroksit yada fotofenton (UV + Fe²⁺+H₂O₂) uygulanması ile KOİ giderim veriminin artarak %41-76 mertebesine yükseldiği ortaya konmuştur. KOİ gideriminin yanı sıra aromatik bileşikler de %20-52 mertebesinde arıtılabilmektedir (Benitez vd., 2001). Fenton oksidasyonu (FO), hidrojen peroksit ve demir II tuzunun doğrudan atıksuya ilavesi şeklinde gerçekleşmektedir. FO uygulamasının yeşil zeytin fermantasyon sularının ön arıtılmasında etkin olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, ışıklı ortamda gerçekleşen Foto-Fenton reaksiyonları (Fe²⁺/H₂O₂/UV ve Fe³⁺/H₂O₂/UV) ile organik kirleticinin, özellikle fenol bileşiklerinin, parçalanması önemli derecede artırılabilir. Islak hava oksidasyonu (WAO) yüksek basınç ve ısı altında sıvı içindeki organik maddelerin hava veya oksijen ile oksidasyonu olup zeytinyağı atıksularının biyolojik olarak ayrıştırılabilirliğinin artırılması sağlanabilmektedir (Ayed vd., 2017).

4.2. Biyolojik Arıtma (Biological Treatment)

SZÜ atıksularının arıtılması için uygulanabilecek seçeneklerden bir diğeri de biyolojik arıtmadır. Literatürde aerobik veya anaerobik biyolojik arıtım seçeneklerinin incelendiği çalışmalar yer almaktadır (Polonio vd., 2016; Patsios vd., 2015; Ayed vd., 2013; Brenes vd., 2000; Beltran-Heredia vd., 2000). Aerobik biyolojik arıtma süreçleri ile işletme koşullarına bağlı olarak, organik madde içeriği (KOİ) %75-85% oranına kadar giderilebilmektedir (Garcia vd., 2011). Ancak, suda bulunan polifenol bileşikler nedeniyle daha yüksek bir giderim elde edilememekte, çıkış suyu koyu renkli olup ve kalıcı KOİ içermektedir. Ayrıca, sudaki organik madde içerisinde kompleks bileşikler arttıkça, bu oran daha da azalmaktadır. SZÜ atıksuyu özelinde, aerobik arıtma süreçlerinde mikroorganizmaların adaptasyonu ve türü önemli olmaktadır. Genel olarak mantarların (örneğin *Aspergillusniger*, *Geotrichumcandidum*) fenolik bileşiklerinin ve renk gideriminde bakterilerden daha etkili olduğu görülmüştür (Ayed vd., 2017; Ayed vd., 2013; Kotsou vd., 2004; Angelis vd., 2001). Anaerobik arıtma seçeneği SZÜ atıksuyunun arıtımı için kullanılabilir diğer bir alternatiftir. Aggelis ve arkadaşları (2001) tarafından yeşil zeytin üretimi atıksuyu (acılık alma) ile yapılan çalışmalarda %49 KOİ ve %12 polifenol giderimi elde edilmiştir. Yüksek organik madde konsantrasyonu ve toksik bileşiklerin varlığı düşük arıtma veriminin başlıca nedenleri olarak gösterilmiştir. Beltran-Heredia ve arkadaşlarının çalışmasında (2008) mikroorganizmanın adaptasyonu sonrasında anaerobik arıtma sonucunda %81-94 KOİ giderimi elde edilmiştir.

Aerobik ve anaerobik proseslerin her ikisinin de tek başına etkin bulunmaması halinde, bazı araştırmacılar tarafından, aerobik ve anaerobik yöntemlerin birbirini izleyecek şekilde uygulanmasını önerilmektedir (Beltran-Heredia vd., 2008; Katsou vd., 2004). Aerobik arıtma ile yüksek hidrolik alıkonma sürelerinde %76 mertebesine kadar arıtma sağlanırken, anaerobik – aerobik şeklindeki uygulama ile %83,5 KOİ, %28 toplam fenol giderimi elde edilebilmekte ve daha az çamur oluşmaktadır (Ayed vd., 2017). Ayrıca, biyolojik parçalanmayı arttırmak amacıyla, ön arıtma kademesinde, ileri oksidasyon yöntemlerine başvurulması da dikkat çekmektedir.

4.3. Fiziksel Arıtma Yöntemleri: Membran Filtrasyonu ve Buharlaştırma (Physical Treatment Methods: Membrane Filtration and Evaporation)

Membran filtrasyonu gıda endüstrisi atıksuların arıtılması ve atıksuda bulunan değerli bileşiklerin (örneğin maya, fenol, vb.) geri kazanımında giderek önem kazanmaktadır. Zeytin endüstrisi özelinde de atıksuların arıtılması ve polifenol bileşiklerinin konsantre edilmesi amacıyla membran filtrelerinin kullanılması mümkündür. Garcia-Ivars ve arkadaşları (2015) modifiye edilmiş ultrafiltre (UF) membranların, fenolik maddelerin geri kazanımı amacıyla ilk kademe olarak uygulanabileceğini raporlamıştır. Özellikle, seri olarak işletilen iki veya daha fazla ultrafiltrenin (UF) ardından nanofiltre (NF) kullanılması ile yüksek giderim sağlanmaktadır (Kiai vd., 2014; Cassano vd., 2013; Galanakis, 2012; Mudimu vd., 2012; Galanakis vd., 2010). UF, birçok araştırmacı tarafından, kağıt, gıda veya alkol üretimi gibi farklı sektörlerde atıksu arıtımı amacıyla uygulanmıştır (Cassini vd., 2010; Bhattacharjee vd., 2006; Kim vd., 1997). Zeytin üretimi atıksuyu için de ultrafiltrasyon + nanofiltrasyon/ters ozmoz ünitelerinden oluşan ardışık sistemler önerilmiştir (Tatoulis vd., 2017; Cassano vd., 2013; Galanakis vd., 2010).

Ülkemizde Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından, Susurluk Havzasında yürütülen "Sofralık Zeytin ve Zeytinyağı İşletmelerinin Atıklarının Entegre Yönetiminin Araştırılması" başlıklı proje kapsamında, salamura sularının hibrit proses kullanılarak arıtılması planlanmış, membran (ters ozmoz) ve öncesinde fiziksel + kimyasal arıtma teknolojilerinin kullanılması öngörülmüştür. Ünal ve arkadaşlarının (2018) yaptıkları çalışmada ise siyah zeytin fermantasyon atıksuyunun arıtımı için kimyasal koagülasyon – flokülasyon ve membran teknolojisi (UF+RO)

birlikte kullanılmışlar, KOİ veriminin %35'ten %66 mertebesine yükselmesini UF kullanarak sağlamışlardır. UF ünitesinin ardından, son kademe olarak uygulanan ters ozmoz işlemi ile de %96 üzerinde KOİ giderimi elde edilmiştir.

Buharlaştırma, termal bir ayırma işlemi olup, temelde ısı enerjisi kullanılarak suyun buharlaştırılmasıyla içerdiği safsızlıkların konsantrite edilmesine dayalıdır. Evaporasyon işlemi doğal olarak güneş ışığının etkisiyle buharlaştırma havuzlarında/lagünlerinde yada ticari olarak geliştirilen evaporatörlerde gerçekleşir. Doğal buharlaştırma yönteminde atıksular derinliği fazla olmayan (25-50cm) havuzlarda uzun sürelerle bekletilmekte, atıksu güneş ışığının etkisiyle buharlaşmaktadır. Doğal buharlaşmanın alan ihtiyacı, koku problemi, meteorolojik koşullardan etkilenmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır (Polonioa vd., 2016; Zarkadasvd., 2011; Tsagarakivd., 2007; Brenesvd., 2004). Buharlaştırma havuzlarının uygun olmadığı durumlarda ise mekanik evaporatörler öne çıkmaktadır. Mekanik evaporatörler enerji yoğun sistemlerdir. Arıtma sektöründe (i) Çok Kademeli Ani Damıtma (Multi Stage Flash-MSF), (ii) Çoklu Etkili Distilasyon (Multi Effect Distillation-MED), (iii) Buhar Sıkıştırılmalı (Vapor Compression-VC) sistemler gibi farklı uygulama örnekleri görülmektedir (Dölgen vd., 2013). Gönümüzde evaporatör uygulamaları özellikle sıfır atık deşarjı (ZLD-Zero Liquid Discharge) uygulamalarında tercih edilmektedir. Dereli ve arkadaşlarının çalışmasında (2017) ekmek mayası üretimi yapan bir işletmede, maya ayırımı atıksularının evaporasyon teknoloji ile arıtılması incelenmiştir. Evaporasyon prosesi sonrasında, KOİ ve toplam Kjeldahl azotu (TKN) yüklerinde sırasıyla %53 ve %66 azalma elde edilmiştir.

5. Tartışma ve Sonuç (Discussions and Conclusion)

SZÜ atıksularının yönetiminde, "atıksu miktarı ve özelliklerinin belirlenmesi" ile "uygun arıtma yönteminin seçilmesi" en önemli iki bileşendir. Ayrıca, atıksuyun birleşik veya ayrı toplanması, deşarj edilecek ortam (kentsel kanalizasyon veya alıcı ortam), arıtım sonrası oluşan atıkların bertarafı ve/veya valorizasyonu gibi hususlar da bu süreçte göz önüne alınması gereken diğer bileşenlerdir.

Atıksuyun miktar ve karakterizasyonunun belirlenmesi için en kolay yaklaşım literatürden veri temin edilmesidir. Ancak, atıksu miktarı üretim türüne, uygulanan işlemlere ve bölgeye göre farklılık göstermektedir. Makalenin önceki bölümlerinde de belirtildiği üzere, birim üretim (kg zeytin) başına oluşan atıksu miktarı oldukça geniş bir aralıktadır (0,5-8,5 L/kg zeytin). Atıksu miktarındaki bu değişim arıtma tesisi kapasitesinin belirlenmesinde sorun yaratabilir. Örneğin, yapılan kabullere göre belirlenen havuz hacimleri ve kullanılan arıtma ekipmanlarının kapasiteleri gereğinden büyük olabilir veya yetersiz kalabilir. Atıksu miktarıyla ilgili önemli olan bir diğer husus da sürekliliktir. Acılık alma işlemi zeytin meyvelerinin toplanmasının hemen ardından yapıldığı için süreklilik göstermez, zeytin toplama zamanı süresinde, yılın birkaç ayını kapsayacak şekilde gerçekleşir. Fermantasyon sürecinde salamura tanklarının boşaltılması ve yıkanmasıyla oluşan atıksular ise ürünün satışa sunulmasıyla bağlantılı olduğu için yıl boyunca sürebilir ve piyasadan gelecek talebe göre değişkenlik gösterebilir. Bu nedenlerle, tasarım sürecinin öncesinde, işletmenin atık su miktarları ve zaman içindeki değişimine yönelik verilerin saha çalışmaları yapılarak sağlıklı bir şekilde temin edilmesi önemli görülmektedir.

Tasarım sürecinde dikkate alınması gereken faktörlerden bir diğeri atıksuyun kalite özellikleridir. Atıksu karakterizasyonu, sofralık zeytin üretim yöntemine göre farklılık göstermekle birlikte, daha önce de belirtildiği üzere, genel olarak yüksek miktarda organik madde, fenolik bileşikler, klorür, çözünmüş katı madde içermektedir. Ayrıca, atıksuda bulunan kirlilikler konsantrasyon bakımından da geniş aralıkta değişim gösterebilmektedir. Tablo 1'de belirtildiği gibi, KOİ değerleri 0,3g/L ile 35g/L (yaklaşık yüz kattan fazla) aralığındadır. Bu nedenle, tasarım sürecinde, atıksu miktarında olduğu gibi atıksudaki kirleticiler için de gerekli verilerin, iyi planlanmış saha çalışmaları ile temin edilmesinde yarar vardır. Böylelikle, özellikle işletme aşamasında ortaya çıkabilecek sorunların asgari düzeyde tutulabilmesi mümkün görülmektedir.

İşletmelerde üretimden kaynaklanan farklı miktar ve kalitedeki atıksuların toplanması konusunun da detaylı incelenmesi gerekir. Yaygın uygulama atıksuların tek bir kanal sistemiyle toplanması ve bertarafı şeklindedir. Ancak, yukarıda da belirtildiği gibi, acılık alma işleminden kesikli, buna karşın fermantasyondan sürekli atıksu oluşması nedeniyle, atıksu miktarında ve kalitesinde zamana bağlı önemli değişimler görülebilmektedir. Bir başka deyişle, acılık alma işleminden zeytin hasadını takiben, birkaç aylık süre zarfında, nispeten yüksek debili, buna karşılık düşük kirlilik içeren sular gelirken; fermantasyon işleminden, talebe bağlı olarak, tüm yıl boyunca nispeten düşük debili ve yüksek kirlilik içeren sular kaynaklanabilmektedir. Dolayısıyla, arıtma yöntemleri açısından, tüm suların karıştırılması yerine, bir tarafta düşük miktar ve yüksek kirlilikteki atıksuların, diğer tarafta yüksek miktar ve düşük kirlilikteki atıksuların arıtılması, daha cazip, kolay ve verimli olabilir. Öte yandan, atıksuların işletmede arıtılması yerine, doğrudan veya ön arıtma işlemi takiben kentsel atıksu toplama sistemine verilmesi de bir başka seçenektir. Bu koşullarda da atık suların birleşik veya ayrı toplanması kararı, kanalizasyona ne oranda verileceği, ön arıtma işleminin niteliği gibi teknik konularla ilgili işletme özelinde çalışılması gereklidir. Son zamanlarda ülkemizde ihtisas organize sanayi bölgeleri oluşumu hız kazanmış ve sofralık zeytin üretimine yönelik

ihhtisas organize sanayi bölgeleri kurulmaya başlanmıştır. Oluşacak atıksu miktarı ve kalitesi, birleşik veya ayrı toplama seçenekleri gibi konularda tekil işletme bazında yapılan tüm tartışma ve değerlendirmeler, ihhtisas organize sanayi bölgeleri özelinde de geçerlidir. Bu nedenle, daha önce belirtildiği gibi, işletmenin veya OSB'deki işletmelerin üretim süreçleri detaylı incelendikten sonra, toplama sisteminin birleşik veya ayrık yapıpı yapılmayacağına karar verilmesi önerilmektedir.

Arıtma yöntemleri açısından ise SZÜ atıksuları için, makalede belirtildiği gibi çok farklı arıtma teknolojilerinin uygulanması söz konusudur. Arıtma seçeneklerinden en basiti, atıksuların sığ lagünlerde biriktirilerek doğrudan buharlaştırma şeklinde sıvı fazdan katı faza dönüştürülmesi, daha sonra, belli aralıklar ile (birkaç yılda bir) yapılacak taban sıyırması ile katı kısmın uzaklaştırılması veya değerlendirilmesidir. Ancak, bilindiği üzere, doğal arıtma yöntemi, atıksu miktarı ve havuzların derinliği göz önüne alındığında, çok geniş alanlar gerektirmekte; ayrıca, koku, sinek, vb olumsuz çevresel etkiler yaratmakta ve meteorolojik koşullardan etkilenmektedir. Seyrek yerleşimin ve arazi fiyatlarının düşük olduğu bazı bölgelerde (genellikle yurtdışı) doğal arıtma seçeneği uygulanmaktadır. Ülkemizde ise SZÜ yapılan alanlar genelde kıymetli arazilerdir. Buralarda doğal yöntemler yerine daha teknolojik arıtma tesislerinin yapılması tercih edilmektedir.

Makalede, teknolojik olarak tanımlanabilecek arıtma tesislerinde kullanılacak yöntemlerle ilgili bilgiler özetlenmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi, sofralık zeytin üretiminden kaynaklanan atıksuların arıtılması için önerilen reçete bir çözüm bulunmamakla birlikte, kimyasal, biyolojik, fiziksel veya bunların bileşiminden oluşan yöntemlerin kullanılması ile istenen standartlar sağlanabilmektedir. Ancak, atıksuda zaman içinde debi (ve kalite) değişimleri olduğu için, arıtma öncesinde hemen daima bir dengeleme işlemi yapılması önemli görülmektedir. Gerek ayrı gerek birleşik toplanan atıksular için dengeleme işleminin ardından farklı arıtma yöntemleri uygulanabilir.

Arıtma yöntemleri arasında önerilen koagülasyon ve flokülasyon, elektrokoagülasyon, ileri oksidasyon (ozonlama, UV radyasyonu, fotokataliz, fenton prosesi, ıslak hava oksidasyonu, vb.) ve adsorpsiyon gibi kimyasal prosesler hiçbir zaman, tek başlarına, tam arıtma niteliğinde sonuç verememektedir. Ancak kentsel kanalizasyona deşarj veya kısmi (ön) arıtmanın yeterli olduğu durumlarda kullanılacak yöntemlerdir. Tam arıtma olması durumunda ise, genellikle biyolojik arıtmanın önüne veya sonuna konacak şekilde (pre veya post) uygulanmakta, böylelikle alıcı ortam deşarj değerlerini sağlayabilmektedir. Özellikle ileri oksidasyon yöntemlerinin biyolojik arıtma öncesinde kullanılması ile atıksudaki ayrıştırılması zor ve toksik bileşiklerin parçalamasının hedeflendiğine; böylelikle biyolojik arıtma kademesinde daha kolay ayrışabilir özellikteki maddelerin giderildiğine ve başarılı sonuçlar elde edildiğine ilişkin çalışmalar yer almaktadır. Öte yandan, membran arıtma veya evaporasyon teknolojileri de SZÜ için bir alternatiftir. İyi bir ön arıtma kademesini takiben kullanılan nonofiltrasyon (NF) veya ters ozmoz (RO) ünitelerinin de etkili olduğu söylenebilir.

Ancak, ön arıtma amacıyla uygulanabilecek arıtma yöntemlerinin sağladığı avantajlar kadar bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, ozon ile oksidasyon yapılması halinde ozon gazının üretilmesi, UV radyasyonu uygulamasında UV ışınının üretilmesi için enerji kullanılması nedeniyle işletme maliyetleri artmaktadır. Fenton oksidasyonu kullanıldığında ise arıtma sonrasında yüksek demir konsantrasyonu içeren çamur oluşmaktadır. Membran filtrasyonda ise SZÜ atıksuyunda bulunan yüksek miktardaki askıda katı madde, membranlarda tıkanmaya neden olarak membran ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenlerle, arıtma yöntemine karar vermeden önce atıksu özelliklerinin iyi tanınması, farklı alternatiflerin incelenerek sağlayabileceği avantajların ve karşılaşılabilecek olumsuzlukların ortaya konması ve pilot ölçekli çalışmaların gerçekleştirilmesinde yarar görülmektedir.

Ayrıca, endüstriyel atıksu arıtımında geri kazanımın öne çıktığı, sıfır atıksu deşarjı (ZLD - zero liquid discharge) yaklaşımının değerlendirilmesi de önerilebilir. ZLD ile atıksu deşarjı olmamasının yanı sıra konsantre malzeme içeriğinde değerli bileşiklerin geri kazanılması mümkün olmaktadır. SZÜ sektöründe proses içi önlemler ile suyun geri kazanılması, arıtma aşamasında atıksudaki fenolün ve/veya tuzun geri kazanılması gibi uygulamalar mümkündür. Ancak, bu amaçla kullanılan teknolojiler, özellikle mekanik evaporatör sistemleri, enerji yoğun sistemler olduğundan yüksek işletme giderleri ortaya çıkmakta, arıtma maliyeti yükselmektedir. Bu nedenle, ülkemizde çevre sektöründeki uygulamaları henüz yaygın olmamakla birlikte ilerleyen dönemlerde döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde örneklerinin artması beklenebilir. Sofralık zeytin üretimi sektörü de bu anlamda bir potansiyel olabilir.

Sonuç olarak makalede detaylı biçimde tartışıldığı üzere, SZÜ atıksularının arıtımı, atıksuyun gerek nicelik gerek niteliğindeki (atıksu miktarı ve karakterizasyonu) önemli değişimler nedeniyle, reçete çözümler (tailor-made) ile gerçekleştirilebilecek bir yatırım süreci değildir. Zeytin üretiminden başlayarak alıcı ortama deşarj aşamasına kadar uzanan süreçte uzmanlık ve deneyim ihtiyacı öne çıkmakta; atıksuyun miktar ve karakterizasyonunun belirlenmesi, uygun arıtma proseslerinin seçimi, uygun ekipman ve malzemenin kullanılması, bilinçli işletim gibi

konuların tümü önemli olmaktadır. Bu nedenle tasarım öncesinde saha çalışmaları yapılarak, daha sağlıklı verilerin üretilmesi ve önerilen alternatiflerin pilot çalışmalar ile desteklenmesinde yarar görülmektedir. Hazırlanan makalede özellikle atıksu özellikleri ve arıtma alternatifleri konularına odaklanılarak tasarımcılar ve karar vericiler için kaynak oluşturması hedeflenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar(References)

- Aggelis, G.G., Gavala, H.N., Lyberatos, G., 2001. Combined and Separate Aerobic and Anaerobic Biotreatment of Green Olive Debitting Wastewater, *J Agric Eng Res*, 80, 283–92.
- Antonin, V.S., Santos, M.C., Garcia-Segura, S., Brillas, E., 2015. Electrochemical Incineration of the Antibiotic Ciprofloxacin in Sulfate Medium and Synthetic Urine Matrix, *Water Res.*, 83, 31-41.
- Ayed L., Chammam N., Asses N., Hamdi, M., 2013. Optimization of Biological Pre-treatment of Green Table Olive Processing Wastewaters Using *Aspergillus Niger*, *Bioremediation&Biodegradation*, 4(9), 1-10.
- Ayed, L., Asses, N., Chammem, N., Othman, N.B., Hamdi, M., 2017. Advanced Oxidation Process and Biological Treatments for Table Olive Processing Wastewaters: Constraints and a Novel Approach to Integrated Recycling Process: A Review, *Biodegradation* 28 (2-3), 125-138.
- Balatorus G., 1997. Sofralık Zeytin İşleme Teknolojisi, *Dünya Zeytin Ansiklopedisi*, içinde (s.295-342), Madrid-İspanya.
- Beltran-Heredia, J., Torregrosa, J., Dominguez, J.R., Garcia, J., 2000. Treatment of Black-Olive Wastewaters by Ozonation and Aerobic Biological Degradation, *Water Res.*, 34 (14), 3515–3522.
- Beltran-Heredia, J., Torregrosa, J., Dominguez, J.R., Garcia, J., 2000. Aerobic Biological Treatment of Black Table Olive Washing Wastewaters: Effect of an Ozonation Stage, *Process Biochem.*, 35 (10), 1183–1190.
- Beltran-Heredia, J., Gonzalez, T., Garcia, J., 2008. Kinetics of the Biodegradation of Green Table Olive Wastewaters by Aerobic and Anaerobic Treatments, *Journal of Hazardous Materials*, 154 (1-3), 839-845.
- Benitez, F.J., Acero, J.L., Gonzalez, T., Garcia, J., 2001. Organic Matter Removal from Wastewaters of the Black Olive Industry by Chemical and Biological Procedures, *Process Biochem.*, 37, 257–265.
- Bhattacharjee, S., Datta, S., Bhattacharjee, C., 2006. Performance Study During Ultrafiltration of Kraft Black Liquor Using Rotating Disk Membrane Module. *J. Clean. Prod.*, 14, 497-504.
- Brenes, M., García, P., Romero, Concepcion, Garrido, A., 2000. Treatment of Green Table Olive Wastewaters by an Activated-Sludge Process. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 75, 459-463.
- Brenes M., Romero C., Castro A., 2004. Combined Fermentation and Evaporation Processes for Treatment of Washwaters from Spanish-Style Green Olive Processing, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 79, 253–259.
- Cappelletti G.M., Nicoletti G.M., Russo C., 2011. Wastewater from Table Olive Industries. F. Sebastian, G. Einschlag (Eds.), *Wastewater—Evaluation and Management*, InTech, içinde (s.351-376) Rijeka.
- Cassano, C., Conidi, L.,Giorno, E.,Drioli, 2013. Fractionation of Olive Mill Wastewaters by Membrane Separation Techniques, *J. Hazard. Mater.*, 248–249, 185–193.
- Cassini, A.S., Tessaro, I.C., Marczak, L.D.F., Pertile, C., 2010. Ultrafiltration of Wastewater from Isolated Soy Protein Production: A Comparison of Three UF Membranes. *J. Clean. Prod.*, 18, 260-265.
- Charoenprasert, S., Mitchell, A., 2014. Influence of California-Style Black Ripe Olive Processing on the Formation of Acrylamide, *J. Agric. Food Chem.*, 62, 8716–8721.
- Chatzisyneon, E., Stypas, E., Bousios, S., Xekoukoulotakis, N.P., Mantzavinos, D., 2008. Photocatalytic Treatment of Black Table Olive Processing Wastewater, *J.Hazard. Mater.*, 154, 1090–1097.
- Cillidag S.I., 2013. Table Olive Processing Technologies. Arcas N. (edt), *Present and Future of the Mediterranean Olive Sector*, içinde (s.67-64). CIHEAM / IOC, Zaragoza.
- Deligiorgis, N.P., Xekoukoulotakis, E., Diamadopoulou, D., Mantzavinos, 2008. Electrochemical Oxidation of Table Olive Processing Wastewater over Boron-Doped Diamond Electrodes: Treatment Optimization by Factorial Design, *Water Res.*, 42, 1229–1237.
- Dereli R.K., Özgün H., Erşahin M. E, Koyuncu İ., Altınbaş M., Öztürk İ., 2017. Evaporasyon Prosesinin Maya Endüstrisi Atıksu Karakterizasyonu ve Arıtılabilirliğine Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19 (56) 389-398.
- Dikici Y., 2017. Sofralık Zeytin Atık Suyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtımı. Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İzmir.
- Dölgen, D.; Sarptaş, H.; Alpaslan, M.N. 2013. Desalinasyon Tesislerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu – YEKSEM*, s.130-135.
- Fendri, I., Chamkha, M., Bouaziz, M., Labat, M., Sayadi, S., Abdelkafi, S., 2013. Olive Fermentation Brine: Biotechnological potentialities and Valorization, *Environ. Technol.*, 34, 181–193.
- Fernández, A.G., Díez, M.J.F., Adams, M.R., 1997. *Table Olives: Production and Processing*, First ed., Chapman & Hall, London.
- Galanakis, C.M., 2012. Recovery of High Added-Value Components from Foodwastes: Conventional, Emerging Technologies and Commercialized Applications, *Trends. Food Sci. Technol.*, 26, 68–87.
- Galanakis, C.M., Tornberg, E., Gekas, V., 2010. Clarification of High-Added Value Products from Olive Mill Wastewater. *J. Food Eng.*, 99, 190–197.
- Garcia-Ivars, J., Iborra-Clar, M., Alcaina-Miranda, M., Mendoza-Roca, J., Pastor-Alcaniz, L., 2015. Treatment of Table Olive

- Processing Wastewaters using Novel Photomodified Ultrafiltration Membranes as First Step for Recovering Phenolic Compounds. *J. Hazard. Mater.*, 290, 51-59.
- García-García P., López-López A., Moreno-Baquero J. M., Garrido-Fernández A. (2011). Treatment of Wastewaters from the Green Table Olive Packaging Industry Using Electro-Coagulation. *Chem. Eng. J.*, 170, 59–66.
- Giannis, A., Kalaitzakis, M., Diamadopoulos, E., 2007. Electrochemical Treatment of Olive Mill Wastewater, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 82, 663–671.
- Gomez, A.H.S., Garcia, P.G., Navarro, L.R., 2006. Elaboration of Table Olives. *Grasas Y Aceites*, 57 (1), 86-94.
- Gotsia, M., Kalogerakisa, N., Psillakis, E., Samaras, P., Mantzavinosa, D., 2005. Electrochemical Oxidation of Oliveoil Mill Wastewaters, *Water Research*, 39 (17), 4177-4187.
- International Olive Council-IOC, 2019. Table Olives World Production [WWW Document], World Table Olive Figures, Production and Consumption, URL <http://www.internationaloliveoil.org/estaticos/view/136-country-profiles> (accessed 12 March 2019).
- Kiai, H., Hafidi, A., 2014. Chemical Composition Changes in Four Green Olive Cultivars During Spontaneous Fermentation. *Food Sci. Technol.*, 57(2), 663–670.
- Kim, J.S., Kim, B.G., Lee, C.H., Kim, S.W., Jee, H.S., Koh, J.H., Fane, A.G., 1997. Development of Clean Technology in Alcohol Fermentation Industry. *J. Clean. Prod.*, 5, 263-267.
- Kopsidas G.C., 1992. Wastewater from the Preparation of Table Olives. *Water Res.*, 26(5), 629–631.
- Kotsou, M., Kyriacou, A., Lasaridi, K., Pilidis, G., 2004. Integrated Aerobic Biological Treatment and Chemical Oxidation with Fenton's Reagent for the Processing of Green Table Olive Wastewater. *Process Biochemistry*, 39 (11), 1653-1660.
- Long, Y., Ni, J., Wang, Z., 2015. Subcellular Mechanism of Escherichia Coli Inactivation During Electrochemical Disinfection with Boron-Doped Diamond Anode: A Comparative Study of Three Electrolytes. *Water Res.*, 84, 198-206.
- Lutke-Eversloh, C., Schulz, M., Wagner, M., Ternes, T.A., 2015. Electrochemical Oxidation of Tramadol in Low-Salinity Reverse Osmosis Concentrates Using Boron-Doped Diamond Anodes. *Water Res.*, 72, 293-304.
- Mudimu, O.A., Peters, M., Brauner, F., Braun, G., 2012. Overview of Membrane Processes for the Recovery of Polyphenols from Olive Mill Wastewater. *Am. J. Environ. Sci.*, 8, 195–201.
- Niaounakis, M., Halvadakis, C.P., 2006. Olive Processing Waste Management: Literature Review and Patent Survey, *Waste Management Series*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Papadaki, E., Mantzouridou, F. T., 2016. Current Status and Future Challenges of Table Olive Processing Wastewater Valorization. *Biochemical Engineering Journal*, 112, 103–113.
- Parinos, C.S., Stalikas, C.D., Giannopoulos, T.S., Pilidis, G.A., 2007. Chemical and Physicochemical Profile of Wastewaters Produced from the Different Stages of Spanish-Style Green Olives Processing. *J. Hazard. Mater.*, 145, 339–343.
- Polonio, E.F., Roca J.A.M., Clar A.I., Molina J.L.A., Alcaniz L.P., 2015. Comparison of Two Strategies for the Start-up of a Biological Reactor for the Treatment of Hypersaline Effluents from a Table Olive Packaging Industry. *Chem. Eng. J.*, 273, 595–602.
- Polonio, E.F., Mendoza-Roca, J.A., Iborra-Clar, A., Alonso-Molina, J.A., Pastor-Alcañiz, L., 2016. Biological Treatment Performance of Hypersaline Wastewaters with High Phenols Concentration from Table Olive Packaging Industry Using Sequencing Batch Reactors. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 43, 44-52.
- Rejano, L., Garrido, A., *El Cultivo del Olivo*, 2004. Barranco D., Fernández Escobar R. and Rallo L. (eds). ISBN: 84-8474-128-1 (Junta de Andalucía), Madrid.
- Salamah, W. K.B., 2015. Treatment of Olive Mill Wastewater by Ozonation and Electrocoagulation Processes. *Civil and Environmental*, 7 (2), 80-91.
- Sanchez, A.H., Beato, V.M., Lopez, A.L., Montano, A., 2014. Comparative Study of the Use of Sarcosine, Proline and Glycine as Acrylamide Inhibitors in Ripe Olive Processing, *Food Addit. Contam: Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.*, 31 (2) 242–249.
- Tatoulis, T.I., Zapantiotis, S., Frontistis, Z., Akratos C.S., Tekerlekopoulou, A.G., Pavlou, S., Mantzavinos, D., Vayenas, D.V., 2017. A Hybrid System Comprising an Aerobic Biological Process and Electrochemical Oxidation for the Treatment of Black Table Olive Processing Wastewaters. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 109, 104-112.
- Tsagaraki, E., Lazarides, H.N., Petrotos, K.B., 2007. Olive Mill Wastewater Treatment, V. Oreopoulou, W. Russ (Eds.), *Utilization of By-products and Treatment of Waste in the Food Industry*, içinde (s.133-157), Springer, New York.
- Türkay, Ö., Barışçı, S., Ulusoy, E., Dimoglo A., 2018. Kanser İlaçları Atıksularının Elektrokimyasal Prosesi ile Giderimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 913-917.
- Unal, B.O., Canbolata, C.B., Dizge, N., Keskinler B., 2018. Treatability Studies on Optimizing Coagulant Type and Dosage in Combined Coagulation/Membrane Processes for Table Olive Processing Wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 301-307.
- Ulusal Zeytin ve Zeytinyağı Konseyi, UZZK , 2019. 2019-2020 Üretim Sezonu Sofralık Zeytin Ve Zeytinyağı Rekoltesi Ulusal Resmî Tespit Heyeti Raporu, http://uzzk.org/Belgeler/UZZK_2019_2020_Turkiye_Rekolte_Raporu.pdf (erişim 18.10.2020).
- Zarkadas, I.S., Pilidis, G.A., 2011. Anaerobic Co-digestion of Table Olive Debittering & Washing Effluent, Cattle Manure and Pigmanure in Batch and High Volume Laboratory Anaerobic Digesters: Effect of Temperature. *Bioresour. Technol.*, 102 4995–5003.